



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS DEL CONFORT DEL VIAJERO EN ZONAS DE TRANSICIÓN CON APLICACIONES MÓVILES.

Trabajo realizado por:
Ana Gómez Coma

Dirigido:
Roberto Sañudo Ortega
Luigi dell'Olio

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Mención:
Transportes y servicios urbanos

Santander, junio de 2019

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO DEL TFG

Análisis del confort del viajero en zonas de transición con aplicaciones móviles.

AUTORA

Ana Gómez Coma

DIRECTORES

Roberto Sañudo Ortega, Luigi dell'Olio

CONVOCATORIA

Junio de 2019

PALABRAS CLAVE

Zonas de transición, confort, comodidad, viajero, aceleración vertical, dispositivos móviles, vía en balasto, vía en placa, aplicación móvil, app.

RESUMEN

Cuando se construye una vía de ferrocarril, además de pensar en el trazado (pendiente, radios de giro, etc.), el tipo de bloqueo del tráfico y los materiales empleados es necesario tener en cuenta al pasajero. Los usuarios son el destinatario final de estas construcciones y, por tanto, el viaje en tren debe resultar atractivo desde el punto de vista del pasajero que ocupa un asiento en el interior del vehículo. Hay muchos parámetros que determinan el nivel de satisfacción que sienten los usuarios al utilizar un medio de transporte y, uno de los más importantes, es el confort o la comodidad durante el trayecto. Dicha comodidad, a su vez, viene marcada por distintos aspectos, pero, en definitiva, depende de si el usuario se siente lo suficientemente cómodo como para realizar la actividad que tiene prevista durante el trayecto (descansar, leer, trabajar con el ordenador, etc.). Dichas expectativas pueden verse o no cumplidas en función del movimiento, ya sea en términos de vibración o aceleración vertical, que siente el individuo desde su asiento.

El presente trabajo aborda el análisis de la comodidad del viajero de ferrocarril cuando atraviesa una discontinuidad estructural en la vía, en este caso, al paso por una zona de transición. En dichas zonas es común que se produzcan cambios de rigidez en la vía y, por tanto, variaciones bruscas en las aceleraciones verticales. De ahí, que resulte sumamente interesante realizar un estudio del confort del viajero a través del análisis de las aceleraciones registradas en el vehículo a su paso por este tipo de estructuras ferroviarias.

Para poder realizar el estudio y análisis de las aceleraciones verticales experimentadas en el interior del tren se han llevado a cabo registros a partir del empleo de aplicaciones móviles. De esta forma, se plantea el uso de dispositivos móviles para realizar un estudio preliminar del estado de la vía y, a partir de ahí, conocer a lo largo de un trayecto cuales son los puntos en los que se producen aumentos o disminuciones importantes en el módulo de la aceleración y seleccionar, dentro de dicho trayecto, una zona de transición. El propósito de seleccionar una zona de transición, aparte de comprobar que efectivamente registra una variación brusca de la aceleración, es poder modelizarla mediante el uso de un software de elementos finitos y así poder correlacionar ambos resultados. El objetivo es doble, por un lado, poder analizar la viabilidad de estas apps (aplicaciones móviles) como sistemas de medición de la calidad y el confort del pasajero y, por otro, una vez correlacionado el modelo con la medición real, obtener más datos sobre este tramo de la vía (por ejemplo, tensiones en los elementos de la superestructura o desplazamientos verticales de los mismos) con una simple medición de aceleraciones.

En definitiva, conviene destacar que, por un lado, se han realizado mediciones con apps y calculado el confort de acuerdo con la norma UNE-EN 12299. Y, por otro lado, se ha modelizado la zona real medida y se ha establecido una correlación entre ambos resultados.

La conclusión más importante obtenida es que es posible la medición del confort a través de smartphones o tablets en el coche de viajeros y, con un modelo más o menos preciso, también es viable conocer otros parámetros. Asimismo, se han establecido soluciones para minorar estas aceleraciones y se ha propuesto una metodología de medición con estas herramientas “comunes” para poder obtener de forma sencilla las

mediciones de confort del pasajero en vehículos ferroviarios. Por último, durante el desarrollo del presente TFG, también se ha visto que es posible realizar registros de imperfecciones mediante mediciones sucesivas alejadas un intervalo de tiempo.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

AENOR, UNE-EN 12299. 2009.

Esveld Consulting Services, “DARTS: The Dynamic Analysis of Rail Track Structures,” pp. 1–114, 2002.

R. Sañudo Ortega, “Optimización en el diseño de zonas de transición en vías de alta velocidad usando métodos numéricos.”

R. Sañudo, L. Dell’Olio, J. A. Casado, I. A. Carrascal, and S. Diego, “Track transitions in railways: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 140–157, 2016.

M. Melis Maynar, *Apuntes de introducción a la Dinámica vertical de la vía y a las Señales digitales en ferrocarriles*. 2008.



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANALYSIS OF PASSENGER COMFORT IN TRACK TRANSITION ZONES USING APPS.

Author:

Ana Gómez Coma

Director:

Roberto Sañudo Ortega
Luigi dell'Olio

Degree:

Civil Engineering

Field:

Transport Engineering

Santander, June 2019

DEGREE FINAL PROJECT

TITLE

Analysis of passenger comfort in track transition zones using apps.

AUTHOR

Ana Gómez Coma

DIRECTORS

Roberto Sañudo Ortega, Luigi dell'Olio

DATE

June 2019

KEYWORDS

Track transition zones, comfort, passenger, vertical acceleration, mobile devices, smartphones, ballast track, slab track, mobile app, mobile application, app.

ABSTRACT

When a railroad is built, besides thinking about geometric design and layout (slopes, cants, turning radiuses, etc.), signalling block system method, and materials to use; passengers have to be taken into account. Users are the reason of being of these infrastructures, so they must be attractive from the point of view of a traveller sitting inside the railway vehicle. Comfort during a journey is one of the most important parameters which determine satisfaction level in transportation. Several factors describe comfort, but in essence, it is what makes users feel at ease enough to do what they had planned to during the trip (resting, reading, working with a laptop, etc). The movement (a combination of vibrations and vertical accelerations) suffered by a sitting individual can make the difference between these expectations being fulfilled or not.

The present research work makes an analysis of passenger comfort when the train goes through a track transition zone where, due to the usual track stiffness changes, the train suffers abrupt vertical acceleration variations. Hence, it is extremely interesting to carry

out a study of passenger comfort considering the different accelerations suffered by the railway vehicle over this kind of areas.

In order to record vertical accelerations inside the train body, measurements have been taken using smartphone apps. Thus, the use of these devices is considered to carry out a preliminary study of the state of the track, to ascertain which points along it have important acceleration magnitude changes. Then, choosing a transition zone will lead to being able to verify that, as expected, it induces a variation of the acceleration; and to compare the readings from smartphone apps with the results from a finite element modelling software, with two main objectives. The first one consists on analysing the feasibility of apps as tools to measure the quality and comfort of the passenger and, the second one, consist on modelling with a dynamic finite element software and establish feasible correlations between measurements and modelling more track data (vertical stress and vertical displacements).

It should be noted that to calculate the different parameters (measurements with apps and comfort) the UNE-EN 12299 standard has been used. On the other hand, the actual track transition zone where measurements were obtained has been modelled. A correlation was found between both results. One of the main conclusions is that it is feasible to make comfort measurements using smartphones.

Likewise, solutions have been established to reduce these accelerations and a new measurement methodology has been proposed using these 'common' tools so passenger comfort measurements can be obtained in a simple way and by means of modelling some important parameters of track performance can be obtained.

BASIC BIBLIOGRAPHY

AENOR, UNE-EN 12299. 2009.

Esveld Consulting Services, "DARTS: The Dynamic Analysis of Rail Track Structures," pp. 1–114, 2002.

R. Sañudo Ortega, "Optimización en el diseño de zonas de transición en vías de alta velocidad usando métodos numéricos."

R. Sañudo, L. Dell'Olio, J. A. Casado, I. A. Carrascal, and S. Diego, "Track transitions in railways: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 140–157, 2016.

M. Melis Maynar, Apuntes de introducción a la Dinámica vertical de la vía y a las Señales digitales en ferrocarriles. 2008.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Antecedentes: la importancia del ferrocarril en España	8
1.2. Justificación del Estudio	10
1.3. Confort de los usuarios	13
2. ESTADO DEL ARTE	14
2.1. El vehículo	14
2.2. La vía	15
2.3. Estructura.....	15
2.4. Zonas de transición	16
2.5. Interacción vehículo vía	20
2.6. Confort del viajero	20
2.7. Uso de aplicaciones móviles para la medición del confort e imperfcciones en la vía.	22
3. METODOLOGÍA	24
3.1. Descripción de las mediciones in situ	26
3.2. Descripción del programa de simulación dinámica en elementos finitos 2D utilizado.	30
3.3. Definición del modelo de vía	32
3.4. Definición del modelo del vehículo	35
4. CASO DE ESTUDIO	38
5. RESULTADOS.....	40
5.1. Resultados de las mediciones in situ	40
5.1.1. Trayecto de ida	41

5.1.2. Trayecto de vuelta.....	48
5.2. Cálculo del Confort (norma UNE-EN 12299).....	54
5.3. Aproximación a una nueva fórmula de cálculo del confort.....	59
5.4. Resultados del modelo.....	63
5.5. Comparación entre resultados del modelo e in situ	67
5.6. Otros datos obtenidos del modelo	69
5.7. Soluciones al problema	71
5.8. Comparativa de costes.....	72
6. DISCUSION	78
7. CONCLUSIONES	79
REFERENCIAS.....	84

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Estación de Langreo a mediados del siglo XX (Fuente: La Nueva España). 8	
Ilustración 2: Viajeros en ferrocarril entre 2.005 y 2.016 (Fuente: Observatorio del Ferrocarril en España y Ministerio de Fomento)	10
Ilustración 3: Concepto de rigidez de vía [11]	14
Ilustración 4: Sección de vía clásica en balasto (Fuente: Oostermeijer y Kok (2000)[20])	16
Ilustración 5: Sección de una vía en placa con carril embebido (Fuente: Oostermeijer y Kok (2000)[20]).....	16
Ilustración 6 Sistema de vía sin balasto (vía en placa): Subsistema y componentes [23]	18
Ilustración 7: Ejemplo de zona de transición (Fuente: GIST UNICAN)	20
Ilustración 8: Actividades y posturas tenidas en cuenta en la realización de estudio [29]	21
Ilustración 9: Comparativa entre aceleraciones registradas en un acelerómetro y en dos dispositivos móviles [35]	23
Ilustración 10: Flujo de trabajo seguido	25
Ilustración 11: Localizaciones de puntos de medición de las aceleración según la norma UNE-EN 12299 [33].....	26
Ilustración 12: Esquema con las localizaciones de los puntos donde se deben llevar a cabo las mediciones	27
Ilustración 13: Esquema del coche de pasajeros en planta con los puntos de medición	28
Ilustración 14: Localización del dispositivo móvil con acelerómetro integrado para la toma de datos en su posición de registro	29

Ilustración 15: Modelo empleado por DARTS para simular vía en placa (izqda.) y vía sobre balasto (dcha.) [19]	30
Ilustración 16: Representación de un tren extraída del Manual de DARTS de un tren [19]	31
Ilustración 17: Traviesa Stedef (Fuente: http://www.railtechsufetra.es).....	32
Ilustración 18: Traviesas Stedef similares a las empleadas en la zona de estudio (Fuente: https://www.flickr.com/photos/felipe_gabaldon/sets/72157604567267733/) ...	33
Ilustración 19: Ejemplo de valores empleados para definir las propiedades mecánicas y geométricas de la vía extraídos de un artículo [43].	35
Ilustración 20: Modelo de vehículo según el sistema de tres masas empleado en DARTS	36
Ilustración 21: Gráfica completa del trayecto de ida en tren	41
Ilustración 22: Gráfica con las aceleraciones de ida en el puente metálico resaltadas .	42
Ilustración 23: Detalle del paso por el puente metálico en el trayecto de ida	42
Ilustración 24: Gráfica con las aceleraciones de ida en el túnel resaltadas	43
Ilustración 25: Detalle del paso por el túnel en el trayecto de ida	44
Ilustración 26: Esquema del detalle del paso del túnel en el trayecto de ida	45
Ilustración 27: Esquema del detalle del paso por el túnel en el trayecto de ida. Bogie delantero	45
Ilustración 28: Detalle del paso por el túnel en el trayecto de ida para cada punto de toma de datos	46
Ilustración 29: Gráficas: original, transformada rápida de Fourier, con filtro de mediana y con filtro Wavelet	47
Ilustración 30: Transformada de Fourier antes y después de filtrar las frecuencias	48
Ilustración 31: Gráfica completa del trayecto de vuelta en tren	49
Ilustración 32: Gráfica con las aceleraciones de vuelta en el túnel resaltadas.....	49

Ilustración 33: Detalle del paso por el túnel en el trayecto de vuelta	50
Ilustración 34: Esquema del detalle del paso del túnel en el trayecto de vuelta	51
Ilustración 35: Esquema del detalle del paso por el túnel en el trayecto de vuelta. Bogie delantero	51
Ilustración 36: Detalle del paso por el túnel en el trayecto de vuelta. Bogie delantero	52
Ilustración 37: Gráficas: original, transformada rápida de Fourier, con filtro de mediana y con filtro Wavelet	53
Ilustración 38: Transformada de Fourier antes y después de filtrar las frecuencias	53
Ilustración 39: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel ida: Bogie delantero	56
Ilustración 40: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel ida: Medio vagón ..	56
Ilustración 41: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel ida: Bogie trasero .	57
Ilustración 42: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel vuelta: Bogie delantero	57
Ilustración 43: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel vuelta: Medio vagón	58
Ilustración 44: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel vuelta: Bogie trasero	58
Ilustración 45: Valores estimados de comodidad media sobre la gráfica de aceleraciones medidas in situ. Trayecto de ida. Bogie delantero.....	60
Ilustración 46: Delimitación de las áreas que van a calcularse sobre la gráfica de aceleraciones medidas in situ.	61
Ilustración 47: Resultado de las aceleraciones obtenidas con DARTS para el cambio de vía en balasto a vía en placa. Trayecto de ida. Bogie delantero.....	64
Ilustración 48: Resultado de las aceleraciones y ubicación aproximada de la zona de transición de vía en balasto a vía en placa. Trayecto de ida. Bogie delantero	65

Ilustración 49: Resultado de las aceleraciones obtenidas con DARTS para el cambio de vía en placa a vía en balasto. Trayecto de ida. Bogie delantero.	66
Ilustración 50: Resultado de las aceleraciones y ubicación aproximada de la zona de transición de vía en placa a vía en balasto. Trayecto de ida. Bogie delantero.	67
Ilustración 51: Gráficas de mediciones in situ y modelo superpuestas. Balasto-Placa. Bogie delantero.	68
Ilustración 52: Gráficas de mediciones in situ y modelo superpuestas. Placa-Balasto. Bogie delantero.	68
Ilustración 53: Desplazamientos verticales obtenidos con DARTS en el interior del vehículo en la transición balasto-placa. Trayecto de ida.	70
Ilustración 54: Desplazamientos verticales obtenidos con DARTS en la vía en la transición balasto-placa. Trayecto de ida.	70
Ilustración 55: Cortantes obtenidos con DARTS en el carril en la transición balasto-placa. Trayecto de ida.	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características técnicas ferroviarias extraídas de los Planes de Actuación de Adif [7][8].....	12
Tabla 2: Sistemas de vía en placa	19
Tabla 3: Características geométricas de la vía.....	34
Tabla 4: Características mecánicas de la vía.....	34
Tabla 5: Propiedades de la locomotora y de los bogies	37
Tabla 6: Características mecánicas del vehículo	37
Tabla 7: Escala de comodidad de los índices Ccy y Ccz según norma UNE 12299: 200956	
Tabla 8: Escala para el índice de comodidad según norma UNE 12299-00	59
Tabla 9: Índices de comodidad por trayecto y posición en el interior del tren	59
Tabla 10: Comparativa de los índices nuevos junto con los anteriores índices de comodidad para cada trayecto y zona del tren.	62
Tabla 11: Costes materiales empleando el registro tradicional de aceleraciones.....	73
Tabla 12: Costes profesionales empleando el registro tradicional de aceleraciones	74
Tabla 13: Costes materiales empleando el registro de aceleraciones mediante dispositivos móviles	75
Tabla 14: Costes profesionales empleando el registro de aceleraciones mediante dispositivos móviles	76

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes: la importancia del ferrocarril en España

A modo de análisis preliminar e introductorio es conveniente hacer hincapié en la importancia del ferrocarril como modo de transporte. Desde que en 1.848 se inaugurara la primera línea de ferrocarril en la Península (Barcelona-Mataró), la ingeniería española no ha cesado en su esfuerzo por ampliar, conservar y mejorar uno de los sistemas de transporte más sostenibles que existen.

Aunque el ancho que se estaba empleando para la construcción de railes en otros países europeos era algo inferior, en España se decidió utilizar 1.668 mm (conocido como ancho ibérico) con el fin de dotar a las potentes locomotoras de buena estabilidad en una orografía complicada. Sin embargo, éste no es el único ancho que se ha venido empleando en España. El segundo más conocido es el ancho métrico cuya distancia entre las caras internas de los railes es de 1.000 mm y que permitió la expansión por zonas montañosas en las que un mayor movimiento de tierras o la limitación de la pendiente hubiera supuesto un coste económico considerablemente superior[1].



Ilustración 1: Estación de Langreo a mediados del siglo XX (Fuente: La Nueva España)

Si en las primeras décadas de existencia del ferrocarril primó el deseo de expansión creando una extensa red radial cuyo centro se ubicó en Madrid, las siguientes

estuvieron marcadas por la conservación y la modernización (especialmente por medio de la electrificación en el siglo XX). Y, finalmente, llegó la estandarización con la decisión de crear una red de alta velocidad con ancho de vía estándar de 1.435mm que permite la prolongación de la red a Francia sin necesidad de aparatos de cambio de ancho en las vías.

A lo largo de más de un siglo han cambiado muchas cosas en lo que al ferrocarril respecta no solo en la construcción sino también en la explotación y en la gestión[2]. Aunque unas decisiones hayan dado mejores resultados que otras, lo que sí que es cierto es que lo que se ha buscado es la optimización e impulsión de un modo de transporte con muchas posibilidades tanto a nivel de transporte de pasajeros como de mercancías. Y hoy en día, el ferrocarril compite en lo que a desplazamientos a larga distancia se refiere con otro modo tan atractivo como es el avión y a corta y media distancia con un inmenso parque de automóviles que circulan por una completa red de carreteras a lo largo de todo el país[3].

Según los últimos datos disponibles, el transporte ferroviario interior de pasajeros asciende a más de 26.000 millones de viajeros/km siendo, por tanto, muy similar al del transporte aéreo y aunque todavía está muy lejos de mover volúmenes parecidos a los del transporte por carretera, es un modo con grandes posibilidades y que ha mantenido una tendencia creciente en los últimos 5 años [2]. En la Ilustración 2, se puede ver como la mayor parte de viajeros que han empleado el ferrocarril como medio de transporte entre 2005 y 2016 ha sido para el desplazamiento de cercanías.

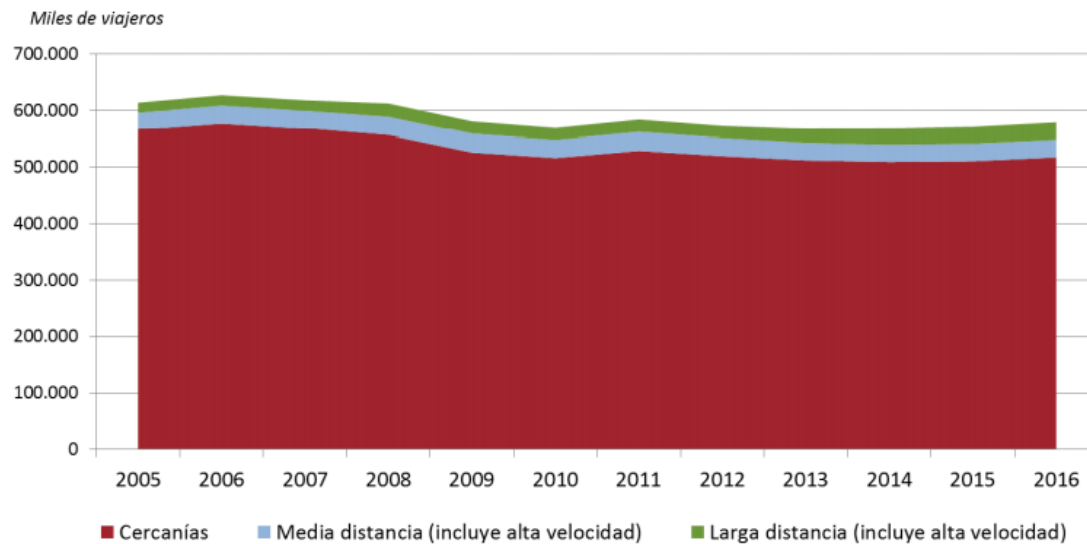


Ilustración 2: Viajeros en ferrocarril entre 2.005 y 2.016 (Fuente: Observatorio del Ferrocarril en España y Ministerio de Fomento)

Continuar con el trabajo que comenzó en el año 1.848 supone perseguir una mejora continua y ser conscientes de que cuando se habla de transporte de viajeros son las personas las que deben ser las máximas beneficiarias de cuantas mejoras se introduzcan y por tanto la seguridad, la comodidad, la rapidez, el precio del billete y la sostenibilidad (entendida como una cualidad que afecta a toda la población) son ejes fundamentales a tener en cuenta en cualquier actuación que se desee llevar a cabo.

1.2. Justificación del Estudio

Cuando se plantea el trazado de una vía ferroviaria, han de tenerse en cuenta diversos aspectos que marca la normativa vigente como pueden ser los estudios de vía, materiales elegidos, zonas de transición y prácticamente en todos los proyectos se omite el destinatario final de la infraestructura, el viajero.

Al planear la infraestructura es necesario hacerla atractiva para los pasajeros. Hay diversos factores que afectan a dicha comodidad como pueden ser el ruido, la temperatura en el interior, incluso el olor de los coches pero en términos de ingeniería de diseño, el factor que más afecta es la vibración y aceleración de los vehículos [4].

En este trabajo se ha decidido tener en cuenta una de estas variables en particular como es la comodidad de los viajeros en determinadas zonas de la infraestructura. Por ello se va a realizar un análisis cuantitativo de cómo los pasajeros

perciben la comodidad de la infraestructura en una zona muy peculiar, la transición entre las zonas de vía en placa y las zonas de vía en balasto. Para llevar a cabo este análisis, se medirán las aceleraciones verticales en el coche de pasajeros.

El propósito de este Trabajo de Fin de Grado es realizar un análisis previo de la infraestructura de la vía, desde el punto de vista de las aceleraciones verticales que se producen, de forma cómoda (desde el coche de pasajeros de un tren) y con una herramienta de fácil adquisición (una aplicación móvil o app). Además, se pretende emplear un modelo informático teórico con el fin de estudiar la correlación entre los resultados obtenidos empleando los dos métodos y obtener un resultado lo más preciso y eficaz. También se espera que este modelo pueda proporcionar otro tipo de resultados de la infraestructura ferroviaria a través de datos de aceleraciones verticales.

La gran ventaja de llevar a cabo el estudio de la infraestructura viaria de esta forma es que permite realizar un análisis previo del estado de la misma de una forma sencilla y económica, sin la necesidad de emplear equipos de medición de tecnología sofisticada con el coste que ello supone.

En resumen, los objetivos generales de este trabajo se enumeran a continuación:

- Emplear una aplicación móvil para realizar una auscultación, de bajo coste, de un tramo de la red de ancho métrico y así evaluar la calidad de la vía.
- Determinar los puntos más comprometidos del recorrido elegido.
- Seleccionar y acotar una posible zona de transición entre vía en balasto y vía en placa (dentro del tramo estudiado), modelizarla y compararla con los resultados del registro de mediciones in situ.
- Correlacionar el modelo teórico con las mediciones reales para obtener así más datos de la zona a estudiar sin necesidad de realizar mediciones in situ.
- Establecer posibles soluciones para reducir las aceleraciones verticales.
- Analizar el uso de aplicaciones móviles para evaluar la calidad de la vía a través de mediciones sucesivas a lo largo del tiempo.

- Proponer el uso de aplicaciones móviles para controlar el estado general de la vía.
- Calcular el ahorro económico derivado de la realización de mediciones con acelerómetros verticales y la medición con aplicaciones móviles.

El Ministerio de Fomento, está llevando a cabo estudios de la infraestructura ferroviaria de cercanías en diversas comunidades del territorio español. En la actualidad, existen Planes de Actuación para la Comunidad de Madrid, la Comunidad Valenciana, Asturias y Cantabria [5]. En todos ellos intervienen Adif (como empresa pública encargada de la construcción y gestión de la explotación) y Renfe (principal operadora ferroviaria de España). Por ejemplo, en el caso de Cantabria la inversión alcanzará los 530 millones de euros en la mejora de la red de cercanías mejorando la infraestructura, la capacidad y la seguridad tanto en las líneas de ancho ibérico como de ancho métrico[6].

Los Planes de Actuación (disponibles en www.adif.es) recogen para cada Núcleo (Comunidad en la que se actúa) las problemática sobre la que se pretende actuar. Tanto para Asturias como para Cantabria, por ejemplo, se hace referencia a la obsolescencia de la infraestructura. En ambos casos llama la atención el elevado número de kilómetros que discurren por ancho de vía de ancho métrico (Tabla 1), un ancho de vía que ya de por sí se encuentra limitado por la velocidad (no se exceden los 100 km/h estando limitada a valores mucho menores dependiendo del trazado)[7], [8].

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Longitud ancho ibérico	Longitud ancho métrico
Asturias	121,6km (32,9%)	247,8 km (67,1%)
Cantabria	88,1km (55%)	72,4km (45%)

Tabla 1: Características técnicas ferroviarias extraídas de los Planes de Actuación de Adif [7][8]

Aunque son importantes las medidas en todos los ámbitos, la vía estrecha es una tipología que, como se puede ver, tiene mucha importancia en algunas zonas de la Península y que no tiene una posición muy ventajosa respecto al ancho ibérico para trayectos largos por lo que a tiempo de viaje se refiere (por el contrario, requiere menos obras de fábrica y afectación del suelo)[9].

Es importante destacar que se pretende demostrar que el uso de herramientas cotidianas hoy en día (año 2019) como son los smartphones y las tablets puede servir para la medición de las condiciones no solo de confort y comodidad sino también del estado general de una infraestructura lineal como el ferrocarril. De este modo se pueden evitar excesivos costes de medición y disminuir el intervalo entre medidas dada la facilidad de manejo y rapidez que presenta la tecnología móvil.

No se pretende acabar con el aparataje de precisión que supone un acelerómetro convencional, sino que se desea obtener el estado de la vía de forma más rápida y rutinaria (gracias a su menor coste). De este modo, la medición con acelerómetros de precisión seguiría siendo necesaria, pero podría ser más puntual y separarse más en el tiempo.

1.3. Confort de los usuarios

Como se ha expresado en la motivación del presente trabajo, uno de los principales retos de una infraestructura de transporte es hacer que los usuarios decidan tenerla en consideración para sus desplazamientos y es aquí donde entran en juego las numerosas variables que como usuarios evaluamos para decidir el modo de transporte correcto.

Una de ellas es indudablemente la comodidad que percibimos en un medio u otro. Para ello es conveniente realizar comprobaciones del confort.

Si tenemos en cuenta que uno de los punto más comprometidos y una de las partes que más se deterioran de la vía se corresponde con las zonas de transición [10] resulta evidente que se justifique la necesidad de realizar un estudio y análisis de estas zonas.

No obstante, la metodología propuesta es extensiva a otras discontinuidades de la vía como son, pasos a nivel, aparatos de vía y, en general, cualquier elemento que suponga una discontinuidad a la comodidad del viajero. También es extensiva a otros tipos de infraestructura de vía, como son las vías convencionales y las de alta velocidad, en ancho ibérico o en ancho internacional.

2. ESTADO DEL ARTE

En lo que se refiere a estudio de zonas de transición, la bibliografía existente en torno a dicho tema es muy extensa. Como resumen generalizado conviene comenzar remarcando que, como ya se ha expresado, una zona de transición es una zona de cambio de material, en la que, por tanto, se produce un cambio de la rigidez de la vía.

La rigidez de la vía se entiende como el desplazamiento que se produce en el carril, cuando sobre el mismo actúa una carga de valor Q (ver Ilustración 3). La formula matemática que establece el valor de la rigidez, viene dada por la ley de Hook.

$$Q = K \cdot z$$

Donde Q es la carga que actúa sobre el carril, z es el desplazamiento que ésta produce en el carril y K es la rigidez. Esta rigidez representa el comportamiento de todos los elementos de la vía bajo el carril y es un parámetro difícil de conseguir.

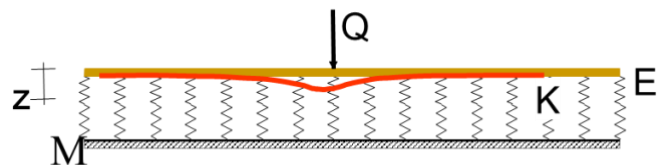


Ilustración 3: Concepto de rigidez de vía [11]

2.1. El vehículo

Tradicionalmente se considera al vehículo como un sistema mecánico dividido en un grupo de cuerpos que se asumen rígidos e interconectados por elementos y juntas. Usualmente no se suele considerar que el cuerpo del vehículo pueda deformarse debido a que solamente un movimiento fuerte y prolongado en el tiempo tendría efecto en el cuerpo [12]. Las uniones de los vehículos son consideradas como variables de contorno cinemáticas que restringen el traspaso de movimiento y fuerzas entre los cuerpos. Para sustentar todas estas afirmaciones tradicionalmente solía emplearse la formulación desarrollada por Nikraves [13].

En la actualidad han surgido numerosas formulaciones que proponen considerar la unión entre los vagones como un elemento capaz de transmitir algo de movimiento, además consideran los defectos de esta unión [14].

2.2. La vía

Resulta conveniente pararnos en el estudio de la vía. Como se ha indicado en la introducción, se puede hablar de dos tipos diferentes, vía sobre balasto y vía sobre placa, siendo necesario introducir zonas de transición entre ambas. En cuanto al estudio mecánico, tradicionalmente la vía se considera como una sucesión de capas y elementos sobre ella cuyo patrón de comportamiento se asemeja a uno viscoelástico [15] [16].

2.3. Estructura

Actualmente, para el estudio de una forma completa y pormenorizada de toda la estructura de la vía junto a la base y al terreno se emplean numerosos softwares que basan sus cálculos en los elementos finitos. Entre los modelos de vía en 3D, se encuentra PLAXIS 3D, un software de elementos finitos que se encarga de analizar problemas geotécnicos relacionados con la deformación y la estabilidad. Otros softwares, como GEOTRACK o KENTRACK consideran un comportamiento elástico-lineal entre las distintas capas que conforman la estructura de la vía [17]. LS-DYNA puede aplicarse para modelar el movimiento del tren al aproximarse a baches o puentes, por ejemplo. Otro programa de elementos finitos empleado para diseñar zonas de transición es ANSYS, aunque existen muchos más como PLAXIS, BLOCKS3D, SAP, etc. [18].

El diseño de estructuras ferroviarias, así como las operaciones encaminadas a su mantenimiento, implican caracterizar la resistencia y la rigidez, así como calcular los esfuerzos y deformaciones a los que estarán sometidas. Todos estos factores que se tienen en cuenta a la hora de llevar a cabo el diseño están, como ya se ha mencionado, relacionados con las vibraciones y aceleraciones que experimentará el viajero. El inconveniente de los modelos arriba mencionados es la dificultad que implica programarlos y, por tanto, el tiempo que hay que destinar a ello.

Existen modelos más sencillos de vigas con un grado de libertad enfocados al cálculo de cargas estáticas y dinámicas que no requiere tanta inversión de tiempo para programarlos y que ofrecen resultados bastante precisos. Uno de estos modelos es

DARTS (*The Dynamic Analysis of Rail Track Structures*). DARTS fue desarrollado para el análisis de la vía considerando una base elástica y puede aplicarse tanto a la clásica vía sobre balasto (Ilustración 4) como a la vía sobre placa (Ilustración 5) [19].

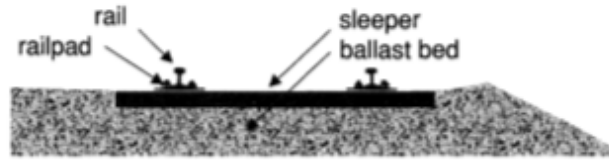


Ilustración 4: Sección de vía clásica en balasto (Fuente: Oostermeijer y Kok (2000)[20])

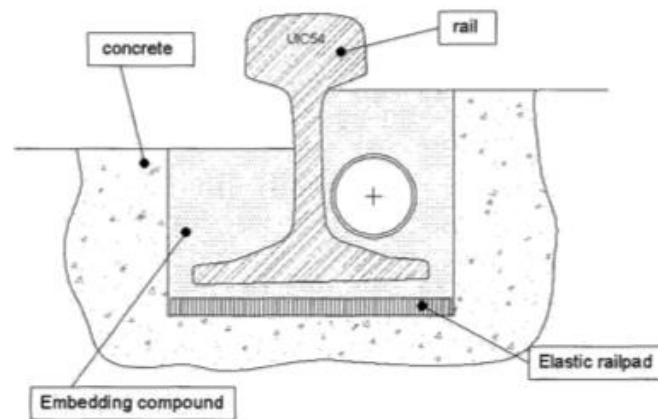


Ilustración 5: Sección de una vía en placa con carril embebido (Fuente: Oostermeijer y Kok (2000)[20])

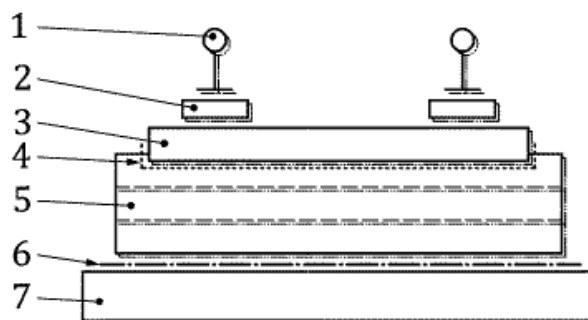
Otra forma de modelar el comportamiento de la estructura es programando la formulación matemática por medio de MATLAB u otro lenguaje de programación. Trabajando directamente sobre el código se puede nivelar el grado de complejidad del modelo decidiendo que simplificaciones emplear y cuáles no.

2.4. Zonas de transición

Conviene definir en este apartado el tipo de zona al que nos referimos cuando hablamos de zonas de transición.

El concepto de zona de transición está asociado a la existencia de dos tipos de sustento para las vías del ferrocarril

- Vía sobre balasto: constituye la estructura típica de construcción de vías de ferrocarril. Su estructura consta de los dos carriles separados mediante traviesas y de un ancho determinado (métrico 1005mm, internacional 1485mm, ibérico 1668mm, etc.) asentado sobre una capa de dicho material. Aunque se ha preferido su elección en múltiples países como España por su economía o su facilidad de colocar en diversos tipos de suelo, los gastos del uso de balasto representan alrededor del 75 % del mantenimiento de la vía [21]. La Ilustración 4, mostrada previamente, correspondía a este tipo de vía.
- Vía en placa: representa la otra alternativa de establecer la estructura sobre la que se sustentan los carriles de rodadura del ferrocarril. Este sistema prescinde del balasto. Consiste en una placa de hormigón sobre la que se depositan traviesas y carril, existiendo diversas configuraciones (losas apoyadas, traviesas apoyadas o embebidas, carril embebido, etc.) A diferencia de la vía en balasto, apenas requiere de mantenimiento (únicamente de amolado, limpieza y apriete de sujeciones), dura unos 20-30 años más y presenta menos problemas, especialmente en trenes de alta velocidad como el vuelo de partículas [22]. A continuación, en la Ilustración 6, se muestra un esquema de este tipo de vía.



Leyenda	Elemento	Tipo
1	Carril/aparato de vía	Subsistema
2	Sistema de fijación /sistema para carriles embebidos	Subsistema
-	Clip, abrazadera, almohadilla de carril, etc.	Componente
-	Adhesivos	Componente
3	Elemento prefabricado	Subsistema
-	Traviesa, bloque	Componente
-	Losa, marco	Componente
4	Capa intermedia, cajón, fijación	Subsistema
-	Capa de relleno de hormigón	Componente
5	Pavimento	Subsistema
-	Pavimento de una sola capa o de múltiples capas	Componente
-	Capa base	Componente
6	Capa intermedia	Subsistema
-	Láminas, películas	Componente
-	Capa de compensación	Componente
7	Subestructura	Sistema

Ilustración 6 Sistema de vía sin balasto (vía en placa): Subsistema y componentes [23]

Explicados los dos tipos fundamentales de vía conviene reseñar que, en una infraestructura real, es común el empleo de ambos. En puentes, viaductos, túneles, etc. la solución adoptada suele ser la vía en placa mientras que en el grueso del recorrido la vía en balasto.

Existen diversos tipos de vía en placa. Una de las clasificaciones más importante y sencilla se basa en el tipo de apoyo de carril, que puede ser apoyo continuo o apoyo discreto. En la siguiente tabla se refleja la clasificación [24] [11].

SISTEMAS DE VÍA EN PLACA					
Apoyo discreto de carril				Apoyo continuo de carril	
Con traviesas o bloques		Sin traviesas			
Traviesas o bloques	Traviesas sobre una	Placas prefabricadas	Traviesas monolíticas	Carril embebido	Carril sujeto y

embebidos en el hormigón	placa de asfalto o de hormigón		(en estructuras civiles)		apoyado continuamente
Rheda	ATD	Shinkansen	Vía	Vía	Cocoon
Rheda2000	BTD	Bögl	pavimenta-	pavimentada	Track
Rheda-Berlín	Getrac		da	Carril ligero	ERL
Züblin	Sato		Via verde	Pasos a nivel	Vanguard
LVT	Walter		Hochtief	Deck Track	KES
Heitkamp			En	Ortec	Edilon
SBV			estructuras civiles	Saargummi	
			FFC		
			BES BTE-		
			BWG/WBG		
			BTE-Hilti		

Tabla 2: Sistemas de vía en placa

Para dar continuidad a los tramos de vía sustentados sobre ambas plataformas ya descritas, resulta conveniente introducir una zona de transición que las conecte a la cual denominamos zona de transición. En estos tramos se trata de cambiar de una forma más o menos gradual de la estructura sobre terraplén a la estructura encajonada sobre la placa. Para ser más exactos, la zona de transición es la parte de la vía que conecta la vía en balasto (menos rígida) con la vía en placa (mucho más rígida).

Sin embargo, el concepto de zona de transición puede resultar más amplio y referirse a cualquier cambio entre estructuras ferroviarias (ya sean naturales o artificiales) que impliquen un cambio en la rigidez de la vía[25].

Estructuralmente se produce una alteración en la mecánica de la vía [26] generándose unos cambios de tensiones y aceleraciones que, como se ha indicado más arriba, producen una alteración en el confort percibido por los usuarios. En la siguiente imagen (Ilustración 7) se puede ver un ejemplo de zona de transición.



Ilustración 7: Ejemplo de zona de transición (Fuente: GIST UNICAN)

En países como España con más de 3100 km de vías de alta velocidad [27], en el cual además se ha decidido adoptar una solución de vía sobre balasto en la parte fundamental del trazado de los ferrocarriles y existen unas condiciones geográficas peculiares que obligan a la construcción de numerosos viaductos y túneles, se pueden ver numerosas transiciones entre placa y balasto lo cual justifica el estudio del confort en dichas zonas.

2.5. Interacción vehículo vía

En el pasado el vehículo y la vía se trataban como partes independientes estudiando la dinámica de cada una de ellas de forma separada. Sin embargo, hoy en día, existen modelos de simulación del sistema conformado por la vía y el vehículo o vagón que permiten predecir la respuesta dinámica de ambos e incluso están preparados para medir la influencia en el comportamiento debido a cambios en la vía o en los componentes del vagón [28].

2.6. Confort del viajero

El número de estudios realizados acerca del confort de los pasajeros en los trenes es muy limitado y no es común que considere el movimiento o las aceleraciones verticales que sufre la persona que viaja.

Un estudio llevado a cabo para medir la influencia de las vibraciones en el tren sobre las actividades que a los pasajeros más les gusta realizar en los viajes (leer y escribir) mostraba que una frecuencia cercana a los 4Hz era la máxima soportable cuando trabajaban sobre una mesa. Sin embargo, el valor anterior dependía de la postura de la persona, así como de la actividad concreta (Ilustración 8). Cuando los pasajeros leían o escribían sobre su regazo la frecuencia promedio soportable, descendía a los 2,5 Hz. El estudio concluye que una mejora en el diseño de la vía, así como en el mobiliario del coche puede incidir en el confort del viajero [29].

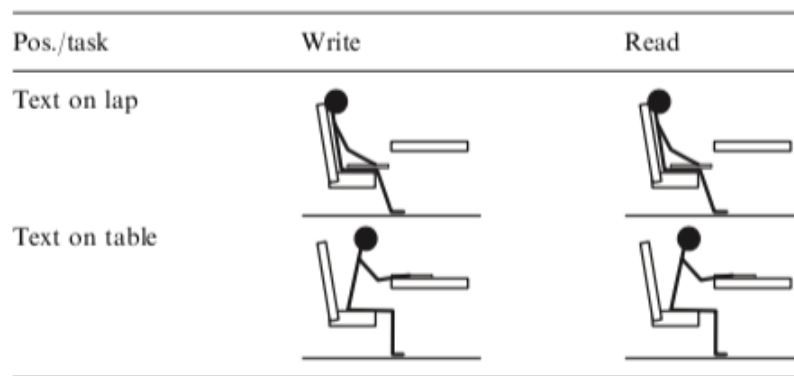


Ilustración 8: Actividades y posturas tenidas en cuenta en la realización de estudio [29]

Otro estudio en la misma línea que el anterior realizado unos años antes para medir el grado de confort (por vibraciones) de los pasajeros en los trenes Inter-City, en Suecia, también concluyo que éstas afectaban considerablemente a las actividades que las personas podían realizar durante el viaje. Igual que en el caso anterior, la postura y la tarea que estuvieran llevando a cabo era determinante [30].

Un artículo acerca de la calidad del servicio de cara a los pasajeros considera el grado de confort en función de la temperatura percibida por el pasajero, la comodidad del asiento y la facilidad para el descanso (en la cual se incluye las vibraciones experimentadas) [31].

Otro estudio más reciente hace referencia al confort del viajero como parte de un conjunto de consideraciones a tener en cuenta a la hora de evaluar la calidad de un servicio de transporte público (del tipo que sea) [32].

En lo que respecta a normativa, la norma UNE-EN 12299, dicta la metodología para cuantificar los movimientos de los vehículos ferroviarios sobre los viajeros y

también para evaluar la comodidad del viaje. La norma se centra en la falta de comodidad del viajero sin incluir los posibles efectos de riesgo y se aplica en vehículos que viajan sobre líneas ferroviarias (incluyendo suburbanas). También es aplicable a los movimientos simulados[33].

La norma UNE-ISO 2631-4 proporciona ayuda en el diseño de sistemas de transporte guiado de pasajeros en lo que respecta a las vibraciones y al movimiento que puedan alterar la comodidad del pasajero. Según se recoge al inicio de esta norma, los pasajeros pueden tener distinta valoración del confort en función de las actividades que esperen realizar durante el trayecto[34]. De esta forma, a igual nivel de vibración, un pasajero que esté realizando un viaje más largo y pretenda leer o escribir puede sentir una mayor falta de comodidad que el que esté realizando un viaje más corto y no tenga prevista ninguna actividad durante el trayecto.

2.7. Uso de aplicaciones móviles para la medición del confort e imperfecciones en la vía.

Existen trabajos que demuestran la validez de la tecnología móvil y el uso de las apps para la realización de mediciones de aceleraciones verticales en la caja de pasajeros de un tren. Aunque este TFG no se centra en demostrar su validez, se aportan a continuación varias referencias en relación con el empleo de diferentes aparatos móviles, así como su comparativa con las mediciones obtenidas con acelerómetros. Con esto se pretende establecer una validación inicial de la metodología empleada en el trabajo.

Según Azzoug & Kaewunruen (2017) [35] los acelerómetros de los teléfonos inteligentes parecen ser capaces de medir el confort de marcha a un nivel comparable al de un acelerómetro más sofisticado. Los teléfonos usados en su estudio tenían 5 años de antigüedad. La Ilustración 9 corresponde a una imagen extraída de su trabajo y en la que se muestra la comparativa entre las aceleraciones registradas por el acelerómetro convencional y la de los dos teléfonos móviles.

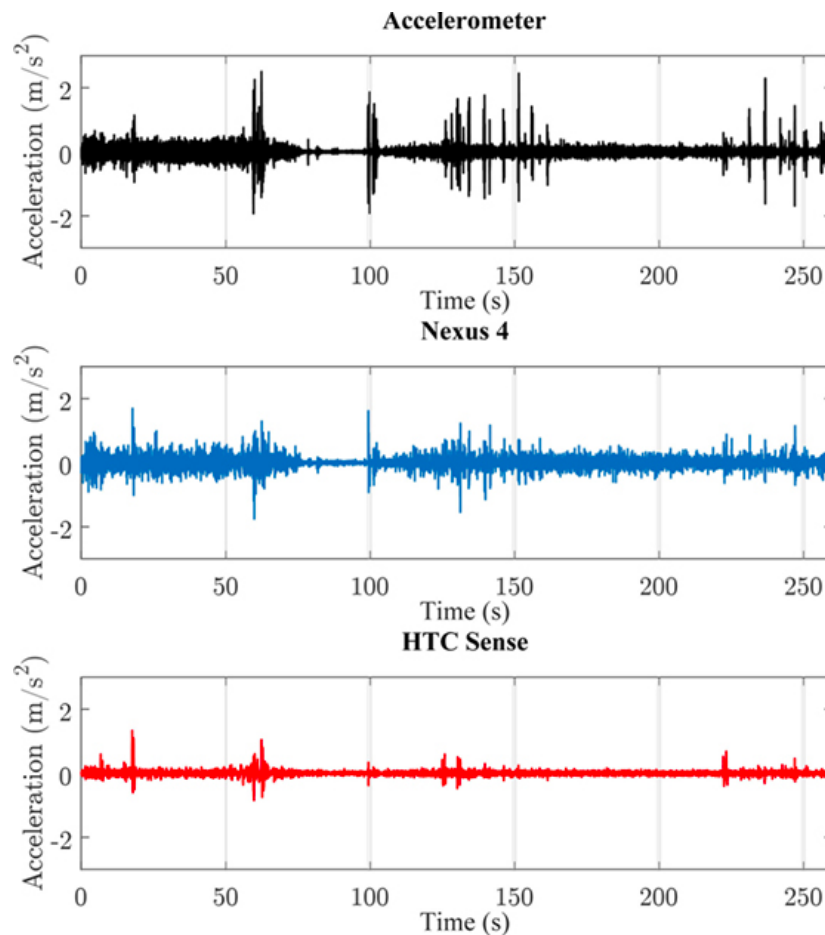


Ilustración 9: Comparativa entre aceleraciones registradas en un acelerómetro y en dos dispositivos móviles [35]

Douangphachanh & Oneyama (2014) [36] realizaron un estudio de la relación entre las aceleraciones recogidas a través de un smartphone (con ayuda de un GPS para registrar la posición del vehículo) y el estado de la carretera. En su estudio analizaron los datos en el dominio de la frecuencia y concluyeron que los sensores móviles presentaban un gran potencial para estimar el estado del pavimento.

Otro estudio realizado en el año 2013 para la monitorización de la calidad de la carretera por medio de dispositivos móviles establece una relación lineal entre las aceleraciones captadas por el acelerómetro del dispositivo y los baches de la carretera [37]. Este último trabajo se basó en la creación de un algoritmo que detectase irregularidades en la carretera a través de los datos recogidos de aceleración vertical en el vehículo.

Por lo tanto, estos estudios preliminares arrojan luz sobre el uso de este tipo de aparatos para la medición de aceleraciones verticales.

3. METODOLOGÍA

El proyecto propuesto trata de analizar un tramo de vía con una diferencia de rigidez elevada empleando aplicaciones móviles (apps) y reproducirlo posteriormente a través de un modelo de elementos finitos de la vía, de modo que, a través de una medición con un aparato móvil, se puede extrapolar y obtener otros parámetros como son aceleraciones en los diferentes elementos de la superestructura de la vía (para establecer sus modos de vibración), desplazamientos o tensiones verticales en cada elemento de la superestructura ferroviaria.

Por un lado, se analizarán los puntos con mayores valores de aceleraciones en la caja de pasajeros y, usando la normativa UNE, se obtendrán los valores de confort de la zona. A la vista de que no se disponen de acelerómetros reales para poder instalarlos y realizar una comparación de las mediciones de éstos con las mediciones obtenidas con los smartphones (o tablets), se realizará una simulación a través de un programa 2D de elementos finitos que permite la simulación dinámica de vía del tramo elegido y previamente medido con la app. Por lo tanto, aunque no se tienen mediciones con acelerómetros, el modelo desarrollado ofrece un buen punto de partida antes del uso de acelerómetros reales para la comparación. También, se compara dicha simulación en elementos finitos con la medición real realizada con smartphones (o tablets).

Por último, una vez obtenidos los valores de confort y comprobada la viabilidad de las aplicaciones móviles para su uso en la medición del confort se proponen varias soluciones para atenuar estos valores de aceleraciones.

En la siguiente imagen (Ilustración 10), se muestra el flujo de trabajo seguido.

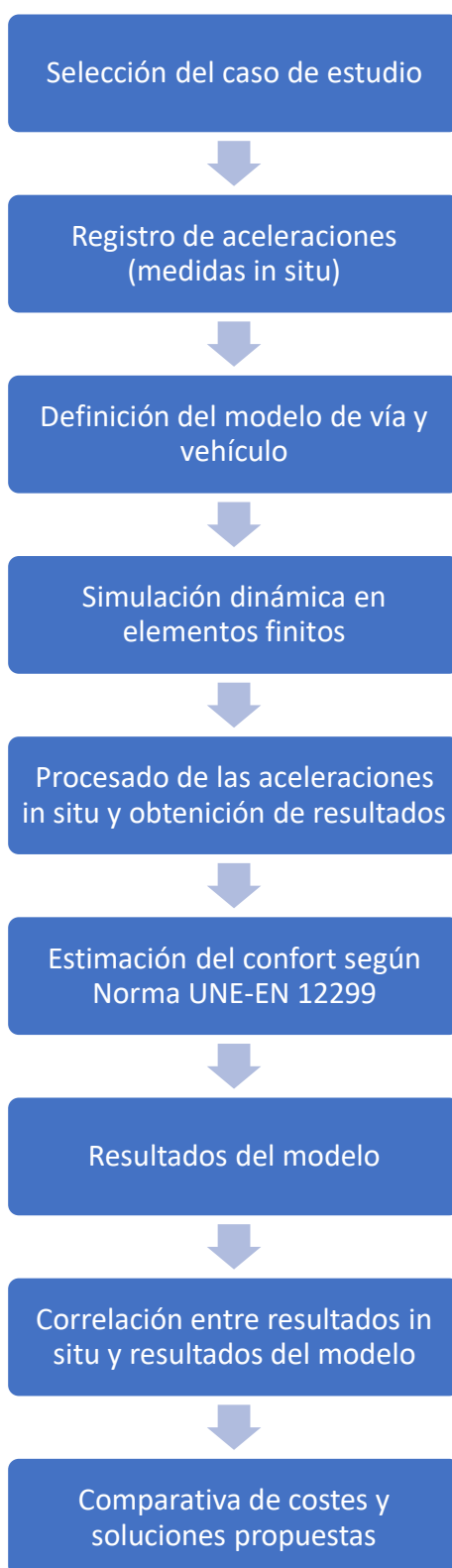


Ilustración 10: Flujo de trabajo seguido

3.1. Descripción de las mediciones in situ

De acuerdo con la norma UNE-EN 12299, las aceleraciones en un punto del vehículo dependen de su localización. Es por ello, que las mediciones deben llevarse a cabo, al menos en el centro del coche (también llamado vagón en este trabajo, aunque al tratarse de viajeros es más adecuado denominarlo coche) y en los extremos de este. También indica que los acelerómetros deben colocarse bajo los asientos más cercanos a dichas posiciones[33]. En la norma también figura un dibujo (Ilustración 11) en el que se proponen los puntos de mediciones.

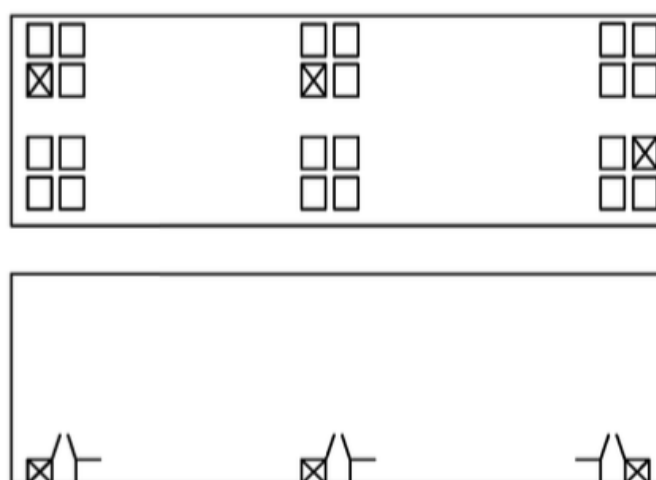


Ilustración 11: Localizaciones de puntos de medición de las aceleración según la norma UNE-EN 12299 [33]

Siguiendo la normativa, se intentan realizar las mediciones en las tres localizaciones del vagón más cercanas al bogie delantero, al bogie trasero y a la mitad de vagón. En la siguiente imagen (Ilustración 12) se resaltan dichos puntos de medición. Es muy importante tener en cuenta este esquema ya que, como ya se ha mencionado, las aceleraciones no se perciben igual en cualquier zona del tren independientemente de que sea cerca o lejos de los bogies. Como se puede ver en la figura, existe una determinada limitación en las zonas en las que se pueden recoger datos ya que la cabina del conductor, dependiendo del modelo de tren, puede ocupar un espacio sobre los bogies.

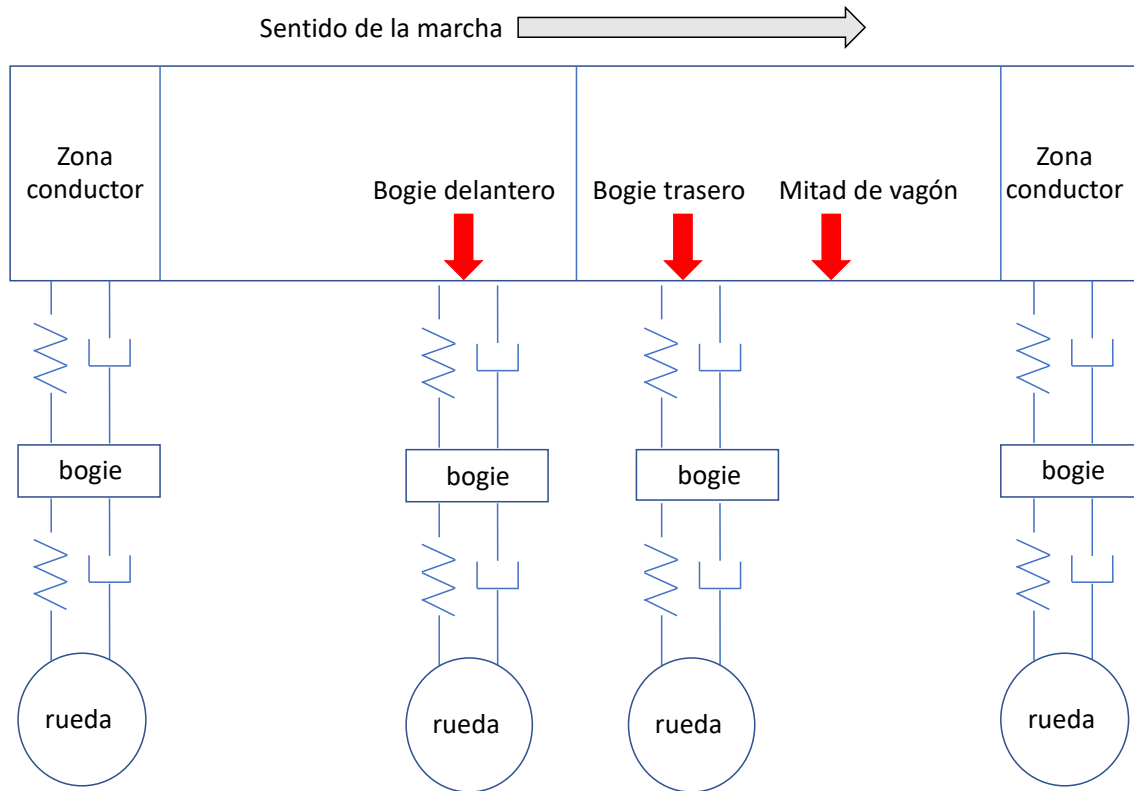


Ilustración 12: Esquema con las localizaciones de los puntos donde se deben llevar a cabo las mediciones

Aunque en el dibujo de la norma se recogen dos de las localizaciones de los puntos de toma de mediciones en el mismo lado del coche y el tercero en el lado contrario, para este trabajo se decide recoger toda la información en el mismo lado del coche de pasajeros. La finalidad de realizar las mediciones en la misma zona del vagón transversalmente es tener todos los datos sobre el mismo carril o lado de la vía de tal forma que, ya que no se van a emplear equipos de medida de la aceleración de precisión, se pueden contrastar los datos obtenidos para ambos bogíes. En la Ilustración 13 se puede ver una localización aproximada de los puntos de medición sobre un esquema de la planta del coche.

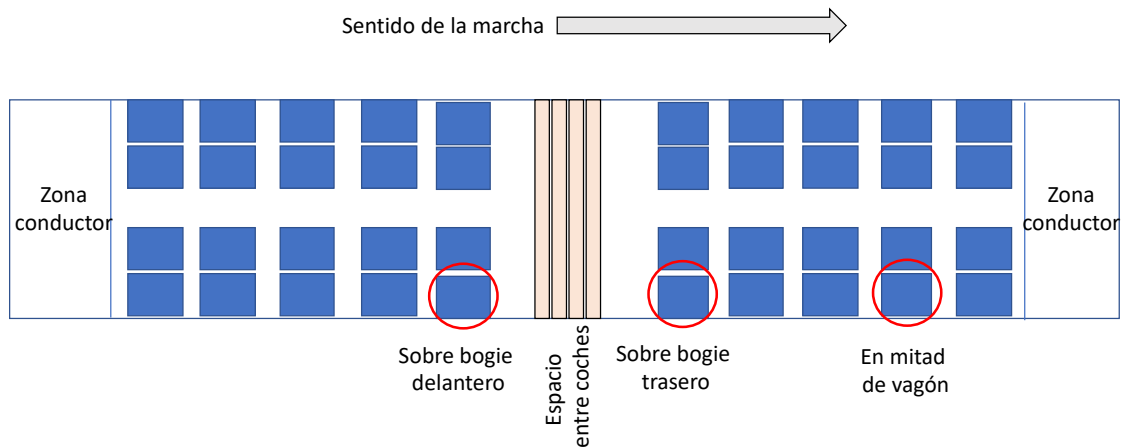


Ilustración 13: Esquema del coche de pasajeros en planta con los puntos de medición

Otro aspecto importante es el lugar preciso sobre el que se apoya el dispositivo con el que se van a grabar las aceleraciones. Para que éstas resulten lo menos alteradas posibles, se coloca directamente sobre el suelo pues, colocarlo sobre el asiento haría que este las amortiguase en parte y, como es lógico, sostenerlo en la mano podría hacer variar los datos por completo (Ilustración 14). A su vez los acelerómetros de los dispositivos poseen su sistema de coordenadas interno de tal forma que no es indiferente colocar uno de una forma y otro girado 90° o 180°. Todos deben estar orientados hacia la misma dirección. Como ya se ha mencionado, la norma indica que el punto adecuado de medida es bajo la proyección del centro del asiento. Al utilizar dispositivos móviles es complicado respetar esta colocación (es más práctico poder ver la pantalla para comprobar que el registro se realiza adecuadamente). Sin embargo, se intenta cumplir en la medida de lo posible.



Ilustración 14: Localización del dispositivo móvil con acelerómetro integrado para la toma de datos en su posición de registro

El acelerómetro tampoco es igual en unos dispositivos y en otros así que se han empleado tres tablets iguales, de la misma marca (Samsung) y modelo (Galaxy Tab 3 Lite T113) y que, por tanto, cuentan con el mismo sensor para medir las aceleraciones. Antes de comenzar el trayecto se sincronizó la hora en los tres para tener la misma referencia.

En la tienda de aplicaciones de Android (Play Store) figuran distintas apps para medir las aceleraciones verticales. Para este trabajo resultan interesantes aquellas que permiten el registro de todas las aceleraciones medidas (no solo la visualización por pantalla) ya que luego se emplearán los resultados. En este estudio se ha decidido emplear una app gratuita que se ajusta a esta especificación y se denomina *Sensor Tracker (Location, Ambient, Graph and Log)*. Su desarrollador es *Bicasoft Technologies*.

Además de dicha app se ha empleado otra para algunos de los registros previos a los que finalmente se han utilizado en este trabajo, y que se denomina *Accelerometer*

Analyzer. Su desarrollador es *keuwsoft* y también permite registrar la aceleración vertical cada 10 milisegundos aproximadamente.

Es necesario combinar esta app con otra en la que se pueda ir guardando el recorrido (coordenadas GPS) seguido por el tren para luego poder utilizar las aceleraciones verticales únicamente en los puntos del recorrido que resulten interesantes para el estudio. También existen distintas aplicaciones adecuadas para este propósito, pero la elegida es *Geo Tracker* y su desarrollador es *Ilya Bogdanovich* y, al igual que la primera, está disponible de forma gratuita en la tienda de aplicaciones.

3.2. Descripción del programa de simulación dinámica en elementos finitos 2D utilizado.

El programa informático utilizado para generar el modelo de vía es DARTS y como ya se especificó en el apartado *Estructura*, dicho programa considera que la base de la vía es elástica. Como ya se mencionó también, con el programa se pueden simular tanto vías clásicas de carriles y traviesas como vías en placa con carriles embebidos en ellas. En este trabajo se utilizarán los dos tipos de vía ya que se emplearán zonas de transición.

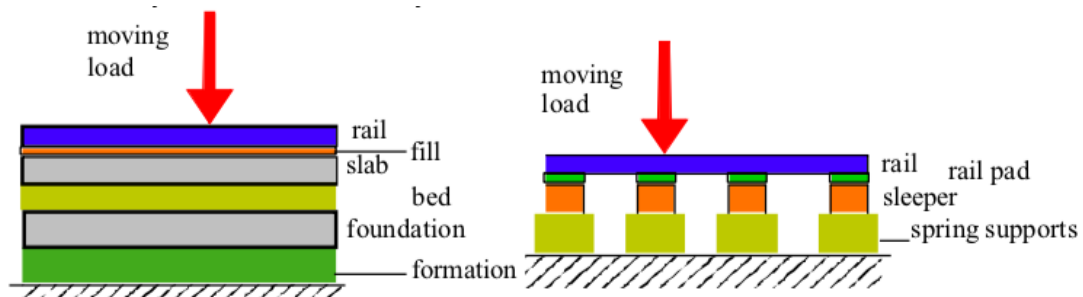


Ilustración 15: Modelo empleado por DARTS para simular vía en placa (izqda.) y vía sobre balasto (dcha.) [19]

El software proporciona un entorno para modelar en 2D estructuras y generar simulaciones dinámicas (usando elementos de simetría de vía prescinde de la tercera dimensión). Se pueden introducir cargas fijas (tanto puntuales como repartidas) o cargas dinámicas (pueden variar en el tiempo o en el módulo)[19]. En cuanto a la cimentación, la rigidez se modeliza según la teoría de Winkler o Pasternak. Según dicha teoría de Winkler, el suelo o cimentación se puede expresar como un conjunto idéntico, pero a su vez independiente, de muelles con propiedades elásticas lineales muy cerca unos de otros. Por su parte, el modelo de Pasternak considera la existencia de fuerzas cortantes

entre los muelles que, a su vez, se encuentran conectados en el extremo a una viga que sufre deformación transversal por cortante[38].

Por otro lado, las propiedades dinámicas consideradas en DARTS son el amortiguamiento y la inercia[19]. Para estos cálculos, el programa incluye el uso de coeficientes o factores de amortiguamiento, así como de momentos de inercia, entre otros.

En el Manual del programa se hace referencia a que la forma más adecuada de modelizar un tren es considerarlo como una estructura en movimiento, compuesta por masas, muelles y amortiguadores[19]. Sin embargo, también se pueden realizar cálculos empleando cargas móviles a través de un carril sin tener en cuenta la interacción entre tren y vía[39].

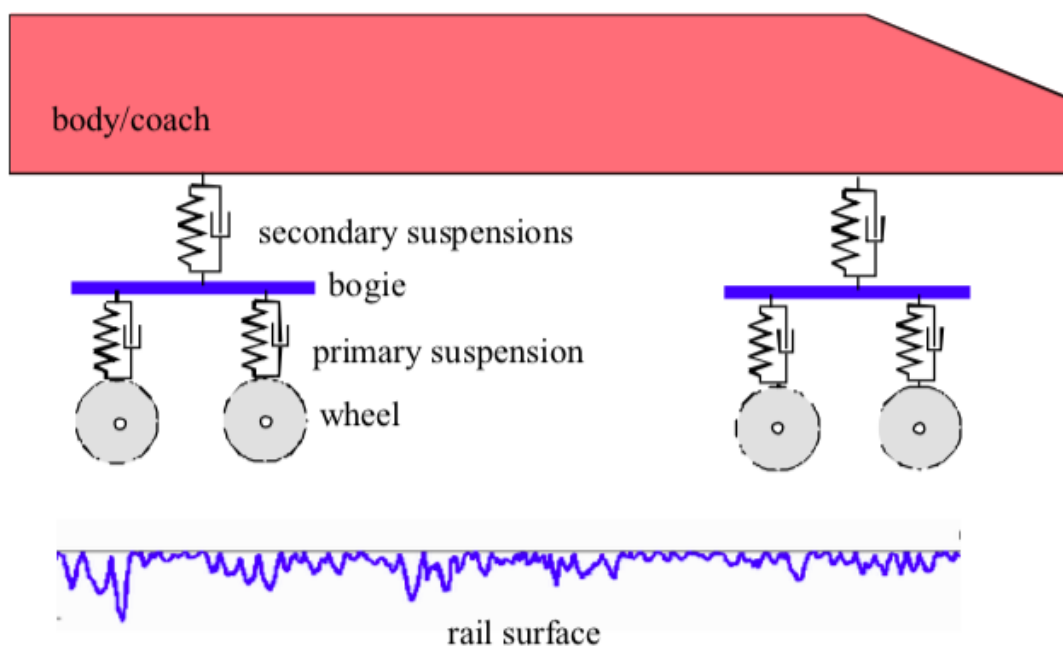


Ilustración 16: Representación de un tren extraída del Manual de DARTS de un tren [19]

Hay dos formas de trabajar con el software: siguiendo una programación “guiada” en la que se avanza capa por capa empleando la interfaz del sistema o a partir de comandos programando los cálculos directamente lo que da más libertad a la hora de trabajar, pero también más complejidad[40].

En el presente trabajo se ha utilizado la segunda forma de trabajar de las descritas previamente. Es decir, a través del código en vez de utilizar la interfaz.

Los resultados que se obtienen del programa son muy variados: aceleraciones, cargas, desplazamientos, etc. [39]. Para el presente trabajo se emplearán fundamentalmente los resultados referentes a las aceleraciones verticales, en especial los de la caja del vehículo.

Por último, a la hora de trabajar con el programa DARTS hay que tener en cuenta algunas limitaciones y asunciones previas que se exponen a continuación [41]:

- La estructura de la vía se encuentra cargada con cargas únicamente verticales.
- Se desprecia la contribución de fuerzas axiales en las capas de la vía.
- En el plano horizontal, las propiedades de la estructura son simétricas con respecto a eje de la vía.
- La longitud de la flexión de flexión de las deformaciones en las capas rígidas corresponde al espesor de la capa rígida.

Además, hay que añadir una limitación más que hay que considerar en este trabajo y es que, los parámetros utilizados de rigidez y amortiguamiento tanto de la vía como del vehículo son difíciles de obtener. Los usados en el trabajo se han obtenidos por medio de valores de referencia empleados en otros estudios.

3.3. Definición del modelo de vía

El sistema de vía en placa empleado en la zona de estudio emplea traviesas Stedef (Ilustración 17).

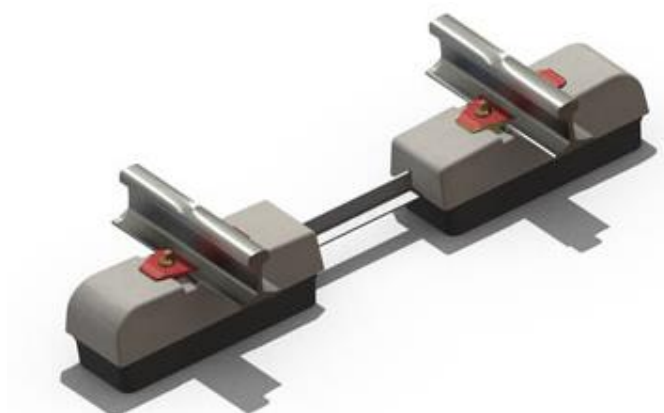


Ilustración 17: Traviesa Stedef (Fuente: <http://www.railtechsufetra.es>)

En la siguiente imagen (Ilustración 18) se muestran este tipo de traviesas empleadas en una vía de ferrocarril. Como se puede ver, están embebidas y apoyadas sobre la placa. Este modelo de traviesas, poseen dos cabezas rectangulares de hormigón armado unidas por una pieza de acero. Como han sido diseñadas para ser colocadas en vías sin balasto, llevan unido a las bases inferiores y laterales de cada cabeza de hormigón caucho con un material elastómero[42]. De esta forma, las traviesas se articulan y actúan de forma elástica, disminuyendo las vibraciones que podrían surgir por la ausencia de balasto.



Ilustración 18: Traviesas Stedef similares a las empleadas en la zona de estudio (Fuente: https://www.flickr.com/photos/felipe_gabaldon/sets/72157604567267733/)

En las siguientes tablas se exponen las características geométricas (Tabla 3) y mecánicas de la vía (Tabla 4).

		Condiciones in situ	Modelo
Carril	UIC-54		
Traviesa. Vía en placa (Sistema Stedef)	Semilongitud $W = L/2$ (m)	0,661	0,67
	Altura H (m)	0,2128	0,22
	Masa (kg)	185	92,5
	Resistencia del cemento 42,5R (N/mm ²)	42,5	42,5

Traviesa (Balasto)	Semilongitud $W = L/2$ (m)	1,8	0,9
	Altura H (m)	0,22	0,22
	Masa (kg)	180	90
	Resistencia del cemento HP80 (N/mm ²)	80	80

Tabla 3: Características geométricas de la vía

	Vía en balasto		Vía en placa
Carril	UIC-54		
Pads (por unidad de longitud)	K (KN/m)	500.000	165.000
	C (KN·s/m)	25	40
Balasto (por unidad de longitud)	K (KN/m)	666.667	-
	C (KN·s/m)	100	-
Placa (por unidad de área)	K (KN/m)	-	267
	C (KN·s/m)	-	200
Traviesa (Stedef)	E(KN/m)	42.500.000	-
	Coefficiente de Poisson	0,20	-
	Densidad ρ (KN/m ³)	2,40	-
	Constante	$1 \cdot 10^{-5}$	-
Placa HA35 (por unidad de área)	E(KN/m)	-	35.000.000
	Coefficiente de Poisson	-	0,20
	Densidad ρ (KN/m ³)	-	2,40
	Constante	-	$1 \cdot 10^{-5}$

Tabla 4: Características mecánicas de la vía

Los valores anteriores han sido, en su mayoría extraídos de bibliografía existente al respecto debido a la dificultad que supone extraerlos de la zona donde se efectuó la medición. Aunque algunos valores son comunes o fácilmente extrapolables de vías

similares, no ocurre lo mismo con otros para los que se hace necesario llevar a cabo distintas simulaciones para contrastar en qué casos los resultados se aproximan más a la realidad. El estudio de la importancia de estos parámetros y en qué medida cada uno de ellos puede afectar al resultado final de las aceleraciones podría dar lugar a un largo trabajo al respecto.

En la Ilustración 19, se muestra una tabla con algunos valores característicos para definir la vía extraídos de un artículo. Algunos de estos valores como la rigidez (K) y la amortiguación (C) de la placa y del balasto han sido extraídos de esta tabla.

Table 1
Geometry for both types of track models.

		Ballast track	Slab track
Rail		UIC-60 ($AX = 76.56 \text{ m}^2$, $AY = 34.452 \text{ m}^2$, $I_{yy} = 3055 \text{ m}^4$)	
Sleepers	Length (m)	2.6	–
	Height (m)	0.22	–
Slab	Length (m)	–	2.4
	Height (m)	–	0.246
Formation layer	Cross section (m)	5.2	4.8
	Height (m)	0.6	0.75

Table 2
Mechanical properties for the track elements considered in this study (All cases except 5).

		Ballast track	Slab track
Rail		UIC-60	
PADS (per unit of length)	K1 (kN/m)	500,000	165,000
	C1 (kN-s/m)	35	40
Sleepers	E (kN/m)	80,000,000	–
	Poisson Coef.	0.2	–
Slab	E (kN/m)	–	35,000,000
	Poisson Coef.	–	0.2
Ballast/elastic bed (per area unit)	K2 (kN/m)	200,000	80
	C2 (kN-s/m)	24,000,000	200
Foundation layer	K (kN/m)	1,000,000	
	C (kN-s/m)	20	

Ilustración 19: Ejemplo de valores empleados para definir las propiedades mecánicas y geométricas de la vía extraídos de un artículo [43].

3.4. Definición del modelo del vehículo

En el siguiente esquema (Ilustración 20) se muestra un tren compuesto por dos coches de pasajeros de acuerdo con la forma que tiene DARTS de modelizar los vehículos

ferroviarios (sistema de tres masas). A parte de la caja, en el esquema se muestra el conjunto de bogíes y ruedas con el que se distribuye la masa de los vagones y de los pasajeros hasta el suelo. La carga del coche (masa suspendida) pasa a través de una serie de muelles y amortiguadores (amortiguación 2ª) hasta los bogíes (masa semisuspendida) y de ahí hasta las ruedas a través de más muelles y amortiguadores (amortiguación 1ª).

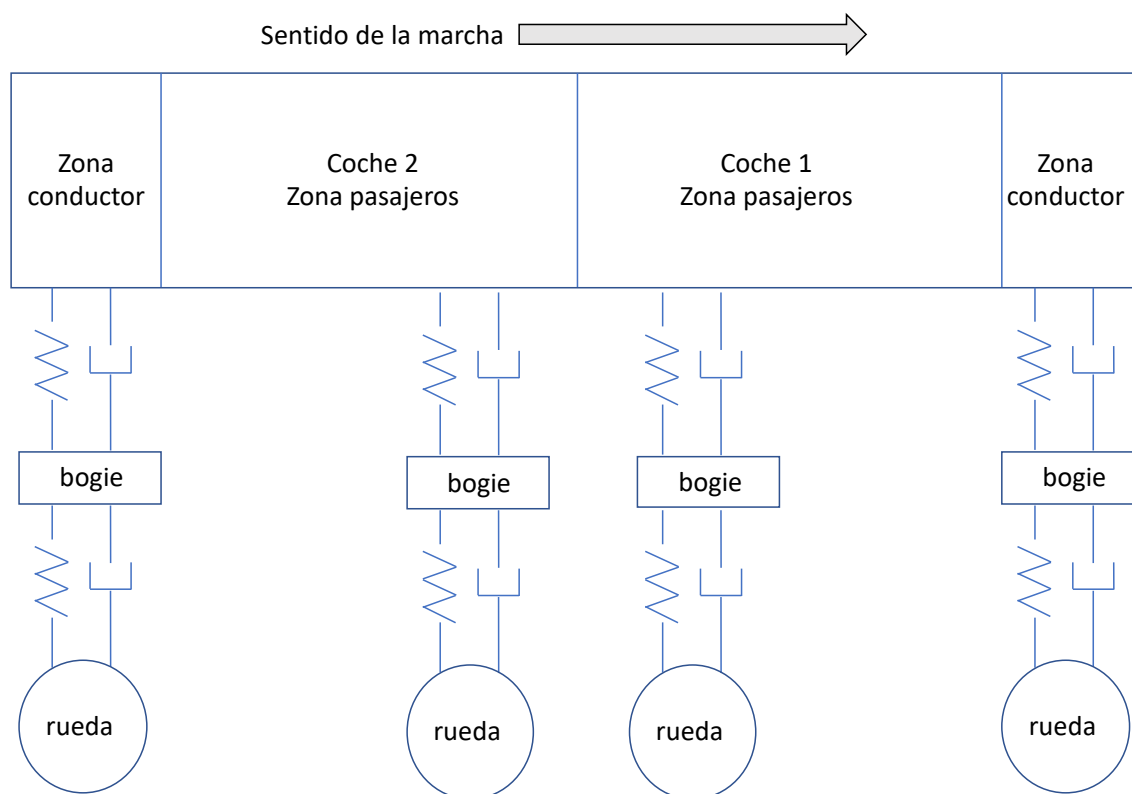


Ilustración 20: Modelo de vehículo según el sistema de tres masas empleado en DARTS

En las siguientes tablas, se exponen las propiedades de la locomotora y de los bogíes (Tabla 5) y las características mecánicas del vehículo (Tabla 6).

Longitud de la locomotora	11 + 10 + 11 = 32 m
Distancia entre los ejes de los bogíes	6,2; 4,8; 5,2; 4,8; 6,2
Masa total	31 + 30 + 27 = 88 T
Masa del bogie	13,5 T
Masa de la rueda	3,375 T
Radio de la rueda	425 mm
Distancia entre ruedas del mismo bogie	1,2

Tabla 5: Propiedades de la locomotora y de los bogies

	Vehículo	Bogie
K(KN/m)	890	1373
C(KN·s/m)	0	1,975

Tabla 6: Características mecánicas del vehículo

Al igual que para definir las propiedades de la vía, para definir el vehículo también ha sido necesario realizar una revisión bibliográfica al respecto ya que los fabricantes de material móvil son bastante reacios a proporcionar este tipo de datos. Además, al tratarse de un tren bastante singular no ha resultado fácil encontrar información al respecto por lo que, para algunos valores, ha habido que recurrir a información propia de vehículos geoméricamente parecidos. Por ejemplo, los valores anteriores de rigidez y amortiguación del vehículo y del bogie han sido extraídos de un libro [11] con información de datos dinámicos de vehículos ferroviarios en los que figura un modelo de tren con ciertas similitudes al que está siendo objeto de estudio.

4. CASO DE ESTUDIO

Este trabajo pretende realizar un análisis de las aceleraciones verticales tal y como las puede percibir un viajero en el interior de un coche de pasajeros. Como ya se ha mencionado, las zonas de transición son puntos de interés en la infraestructura ferroviaria y en ellas existen cambios en la rigidez que pueden generar a su vez variaciones en las aceleraciones experimentadas por los viajeros y, por tanto, en el confort de estos.

Aprovechando que existe un Plan de Actuación del Ministerio de Fomento en varias Comunidades de la Península y, que en algunas de ellas tiene mucha presencia el ancho métrico (que a su vez presenta más limitaciones en cuanto a velocidad), se pretende enmarcar el proyecto en este contexto.

La norma indica que las señales medidas deben pasarse por un filtro de paso bajo [33]. Sin embargo, como el objeto principal de este trabajo es emplear las mediciones in situ para hacer una evaluación preliminar de la vía de forma “bruta” y no refinada esto no se ha llevado a cabo. Aún así, con el fin de evitar conclusiones erróneas (ya que al no aplicar directamente la norma ni emplear acelerómetros profesionales, los resultados pueden no ser reales), se ha decidido no indicar la zona de estudio, únicamente que se trata de un tramo ubicado en una vía de ancho métrico y que contiene una zona de transición.

Por otro lado, para mantener la coherencia del trabajo y ya que se han empleado las mediciones brutas obtenidas in situ, en las simulaciones posteriores también se han representados los resultados “brutos”, es decir, sin emplear ningún filtro.

Para llevar a cabo estas mediciones en el interior del tren no se ha pedido ningún permiso especial a la administración ferroviaria nacional o autonómica ya que se han realizado desde la perspectiva de un pasajero convencional, sin alterar ningún elemento del vehículo ni de la vía y realizando el registro desde el propio asiento del pasajero con el dispositivo móvil (en este caso, tablet).

Una vez seleccionado el tramo se pretende realizar una valoración general de las variaciones en las aceleraciones verticales experimentadas en el mismo utilizando, como ya se ha dicho, un dispositivo móvil (una tablet concretamente). A continuación, se realiza en detalle el estudio de la zona de transición que es la que, posteriormente, se modelizará con el software informático DARTS (Dynamic Analysis of Rail Track Systems), también mencionado anteriormente.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados de las mediciones in situ

El trayecto de ida en tren transcurre por el mismo tramo que el de vuelta ya que lo que se desea es conocer cómo afectan las zonas de transición en la vía a la variación en las aceleraciones verticales en distintos puntos del coche de pasajeros y para ambos sentidos de viaje.

Hay varias infraestructuras que incluyen posibles zonas de transición de la vía:

- Puentes y estructuras de paso: suelen ser construcciones cortas en relación con la longitud total del tren por lo que no es el elemento más adecuado para poder modelizarlo posteriormente. En este trayecto se produce un cambio de rigidez de la vía por el paso de la vía regular del tren a la propia de un puente metálico.
- Túneles: el que está ubicado en el trayecto, al contrario que el puente, tiene una longitud larga y se puede realizar mejor el estudio ya que se pueden identificar más fácilmente los puntos de entrada y salida en ambas direcciones.
- Pasos a nivel: para facilitar el tráfico rodado, en los pasos a nivel normalmente se suele embeber en asfalto los carriles y las traviesas, se puede realizar mediante obra in situ, o a través de elementos prefabricados, cortando y soldando después carriles. Estas zonas poseen una superestructura bastante más rígida que la vía en balasto y, por lo tanto, se genera una discontinuidad.
- Aparatos de vía: en función de la magnitud del aparato y de su localización (estaciones, terminales de carga y descarga, etc.) pueden tener posibles zonas de transición.

A continuación, se muestran de forma gráfica los datos obtenidos de las mediciones realizadas para los trayectos de ida y vuelta.

5.1.1. Trayecto de ida

En la siguiente gráfica (Ilustración 21) se muestran los registros en las aceleraciones en todos los bogíes. El eje de abscisas corresponde a la escala temporal (hora y minuto) mientras que el eje de ordenadas se refiere a las aceleraciones verticales medidas en m/s^2 . Tal y como se puede ver hay tres nubes de puntos, una para cada zona del tren (azul para las aceleraciones del bogie delantero, rojo para las de medio vagón y verde para el bogie trasero).

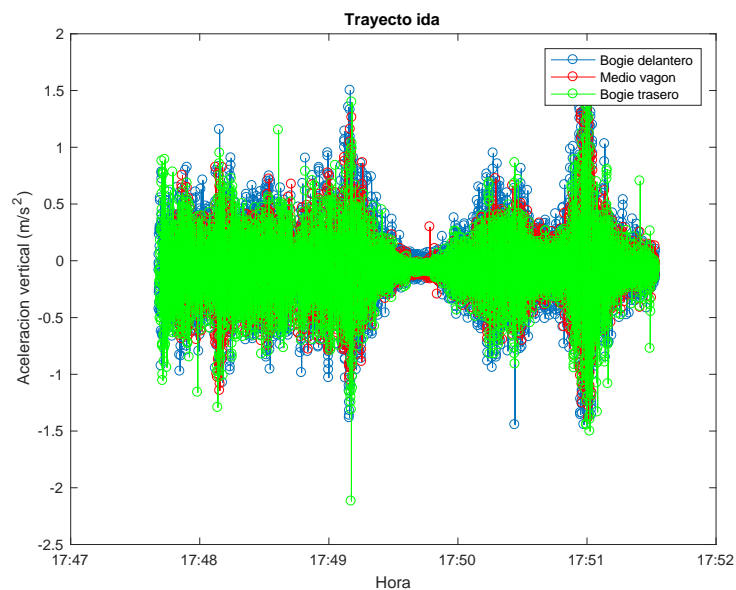


Ilustración 21: Gráfica completa del trayecto de ida en tren

En la Ilustración 22 aparece resaltada, sobre la gráfica que recoge los registros del trayecto completo de ida, la zona que corresponde a la propia del paso por el puente metálico. En principio no parecen apreciarse variaciones bruscas en el módulo de la aceleración vertical en el paso por las zonas de transición del puente. Sin embargo, al ampliar esa parte de la gráfica (Ilustración 23) sí que se pueden apreciar ligeros repuntes en torno a la hora de paso por el puente marcada.

Los registros corresponden a mediciones brutas, es decir, con los datos no filtrados ya que únicamente se pretende ver discontinuidades durante la marcha.

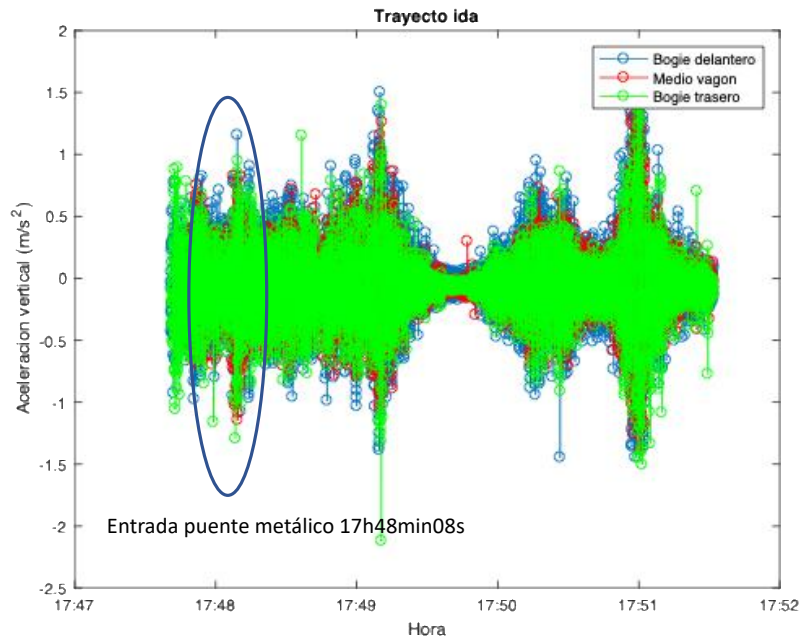


Ilustración 22: Gráfica con las aceleraciones de ida en el puente metálico resaltadas

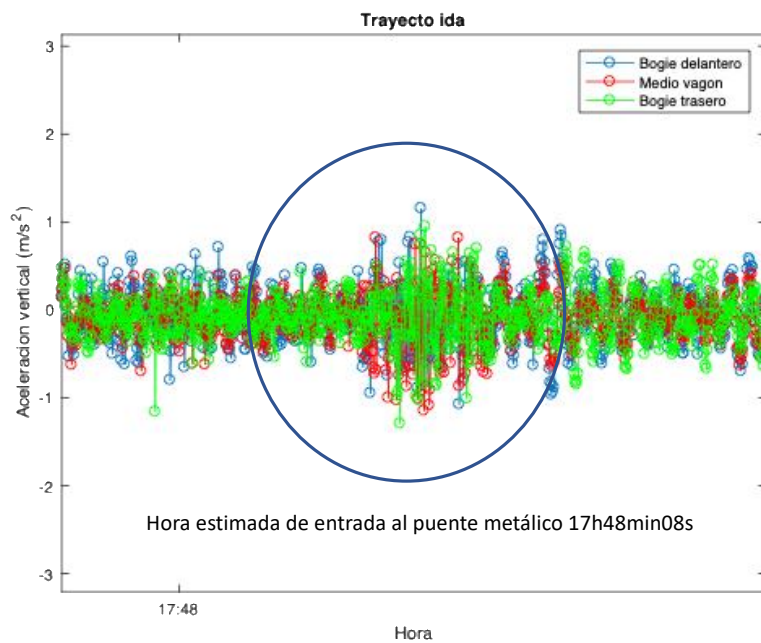


Ilustración 23: Detalle del paso por el puente metálico en el trayecto de ida

En la Ilustración 24 se puede ver la gráfica de conjunto en la que se ha resaltado la zona correspondiente al paso por el túnel. En este caso, sí que se aprecian cambios bruscos en la aceleración vertical registrada tanto a la entrada como a la salida del túnel.

Además, se observa que dichas variaciones se producen para las tres zonas de estudio dentro del coche de pasajeros (un poco menos en la mitad del vagón que en los bogíes).

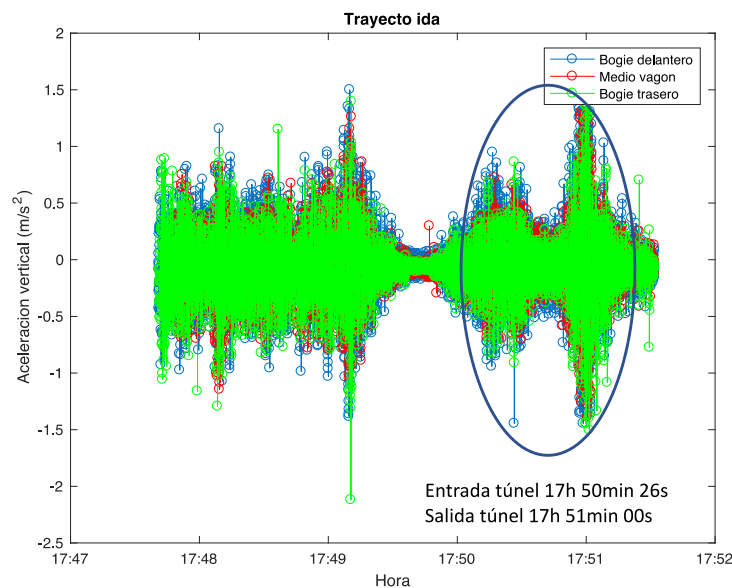


Ilustración 24: Gráfica con las aceleraciones de ida en el túnel resaltadas

En la siguiente Ilustración 25 se puede ver en detalle la aceleración vertical a lo largo de todo el túnel, desde antes de la llegada a la zona de transición de la entrada hasta que se traspasa la correspondiente a la salida. Tanto a la entrada como a la salida, se observa que hay un cambio brusco del módulo de la aceleración. Además, se distingue que, por lo general, la zona del tren que registra las aceleraciones verticales más grandes se corresponde al bogie delantero (en la gráfica aparece en azul), mientras que la que registra las más bajas es el bogie trasero (aunque en lo que respecta a los picos de entrada y salida en la transición son mayores que los de la mitad del vagón).

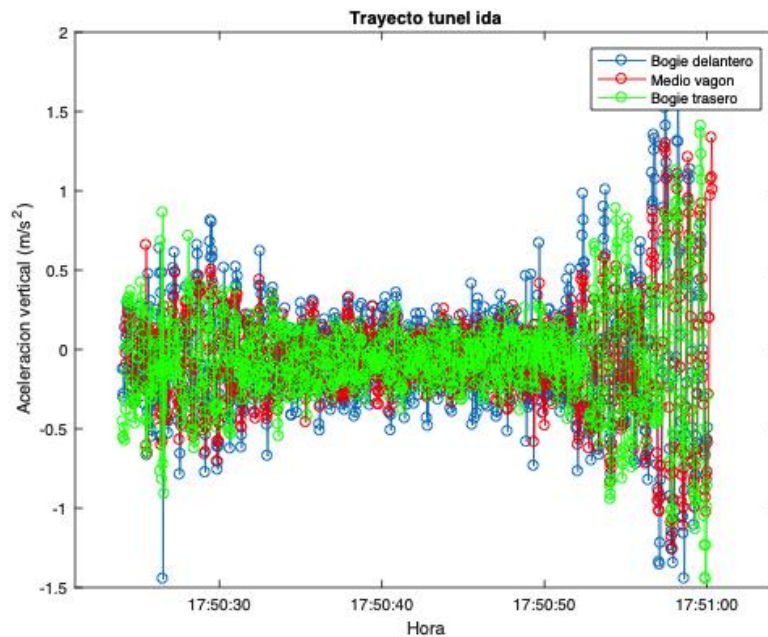


Ilustración 25: Detalle del paso por el túnel en el trayecto de ida

Se aprecia, en la figura anterior, que hay un incremento de aceleraciones verticales a la salida del túnel (a la derecha de la imagen). Esto es debido a que el tren “cae” a la vía en balasto cuando sale del túnel (de la vía en placa).

Hay que tener en cuenta que, para poder apreciar bien el efecto producido a la entrada y a la salida, los puntos que se han seleccionado para la gráfica anterior abarcan un espacio previo a la llegada y otro después de la salida. El túnel mide aproximadamente 250 m y se deja un margen de 65 m a la entrada y 80 m a la salida aproximadamente. En la Ilustración 26 se han representado, sobre el registro de aceleraciones, las líneas estimadas de entrada y salida del túnel y en la Ilustración 27 se han dibujado dichas líneas de forma más precisa (empleando el registro de coordenadas) sobre los datos del bogie delantero.

La velocidad de circulación es pequeña, 11 m/s². Esto es debido a que existe una estación en las proximidades de la entrada al túnel en ese sentido.

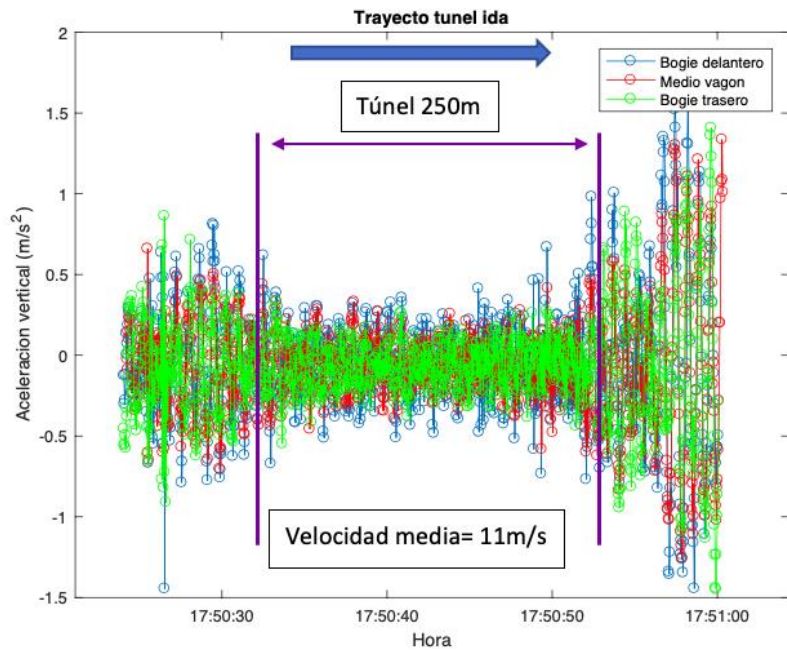


Ilustración 26: Esquema del detalle del paso del túnel en el trayecto de ida

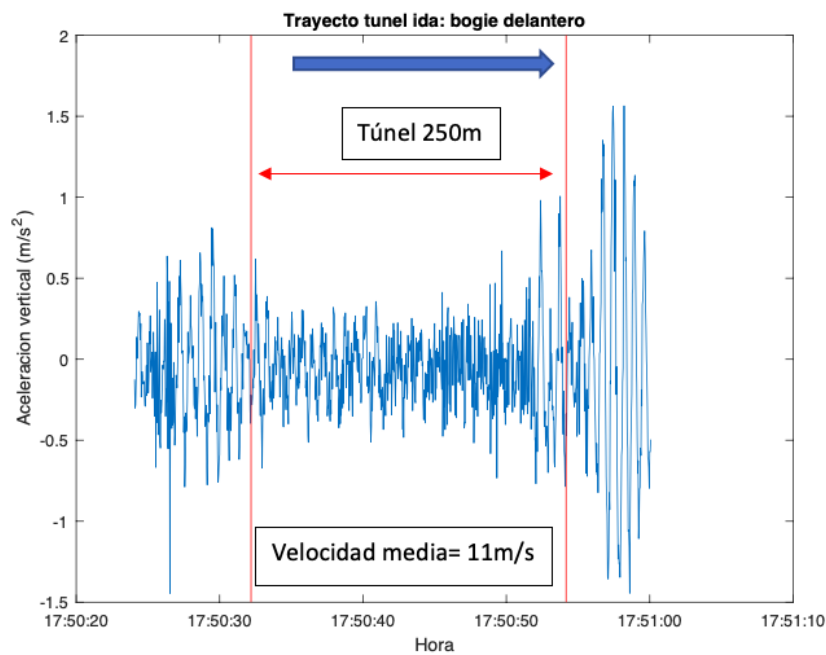


Ilustración 27: Esquema del detalle del paso por el túnel en el trayecto de ida. Bogie delantero

En la siguiente imagen (Ilustración 28) se muestran las tres curvas de forma independiente (en cada posición del tren) para que se puedan apreciar en detalle cada una de ellas, así como la gráfica global. Tal y como se puede ver, en todas se puede distinguir con cierta facilidad la zona de entrada, así como la de salida de la zona de transición (principio y fin de la gráfica).

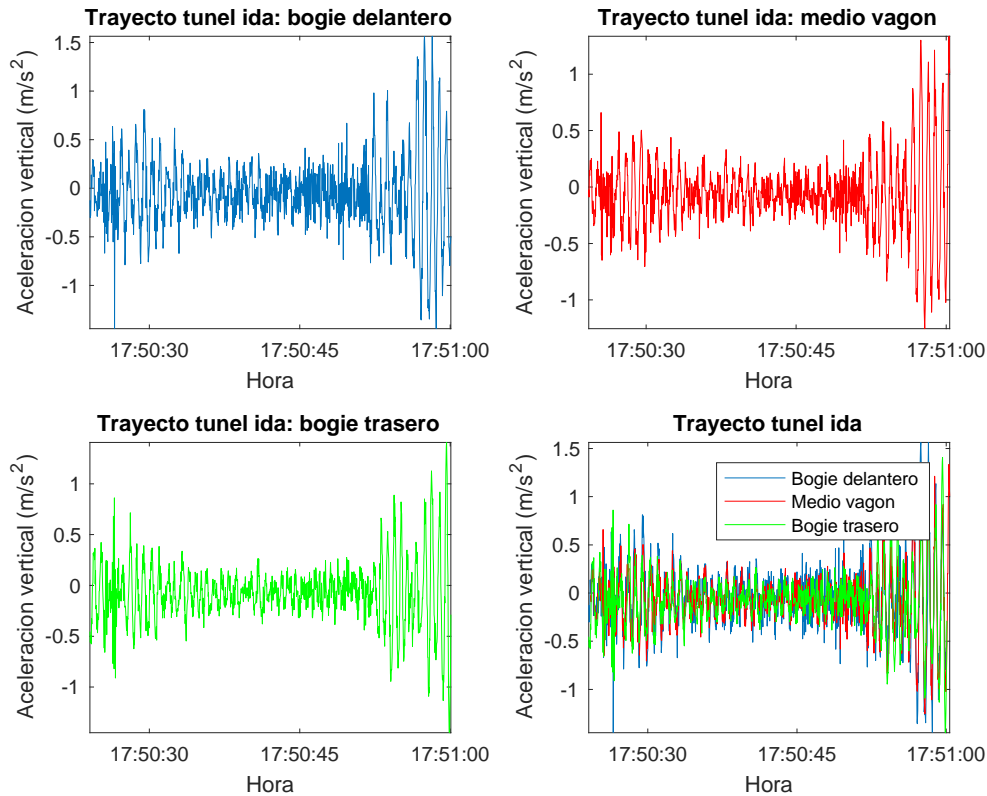


Ilustración 28: Detalle del paso por el túnel en el trayecto de ida para cada punto de toma de datos

Además de las gráficas anteriores obtenidas gracias al registro de las aceleraciones llevado a cabo a través de la aplicación del dispositivo móvil (tablet), se ha realizado un procesamiento de las señales obtenidas aplicando algunos filtros con el objetivo de reducir o eliminar el ruido presente en las medidas. En la Ilustración 29 se muestran distintas gráficas obtenidas a partir de las aceleraciones registradas en el bogie delantero durante el trayecto de ida. Gracias a los filtros aplicados, resulta más sencillo identificar los puntos de entrada y salida del túnel.

En la primera gráfica se puede ver la señal original, mientras que la segunda corresponde a la transformada inversa de Fourier después del filtrado. Para obtenerla se ha seguido el proceso que se emplea normalmente en la reducción de ruido mediante la transformada de Fourier. Primero, y a partir de los vectores de las aceleraciones, se ha calculado (con Matlab) la transformada de 1024 puntos. A partir de ahí, se ha representado el espectro de dicha transformada para ver el rango de frecuencias que abarcaba y se han eliminado aquellas cuya amplitud asociada fuera menor que veinte (se ha tomado un umbral que se ha escogido observando el valor de ruido en varios

espectros). Finalmente, se ha calculado la transformada inversa para poder representarla en el dominio del tiempo, tal y como se ve en la ilustración (fila 1, columna 2).

La tercera gráfica es el resultado de la aplicación de un filtro de mediana (Median filter) de orden 5 para suavizar la curva. En la aplicación del filtro se fija una ventana con N elementos (5 en este caso) que definen su orden y luego se calcula su mediana que será el valor de salida del filtro. Para la selección del orden, se ha filtrado la señal con varios órdenes, y se ha seleccionado el que más ruido elimina, pero sin afectar a la forma de la señal. Aunque para saber cuál es el orden más adecuado habría que realizar un estudio mucho más en profundidad de la señal.

Por último, la cuarta gráfica es la correspondiente a la aplicación de un filtro tipo Wavelet. Esta última se ha realizado mediante una *toolbox* de Matlab que facilita considerablemente el trabajo y los parámetros que se han seleccionado para definirla son el resultado de la experimentación hasta lograr una señal similar en forma a la original, reduciendo significativamente el nivel de ruido presente en ella.

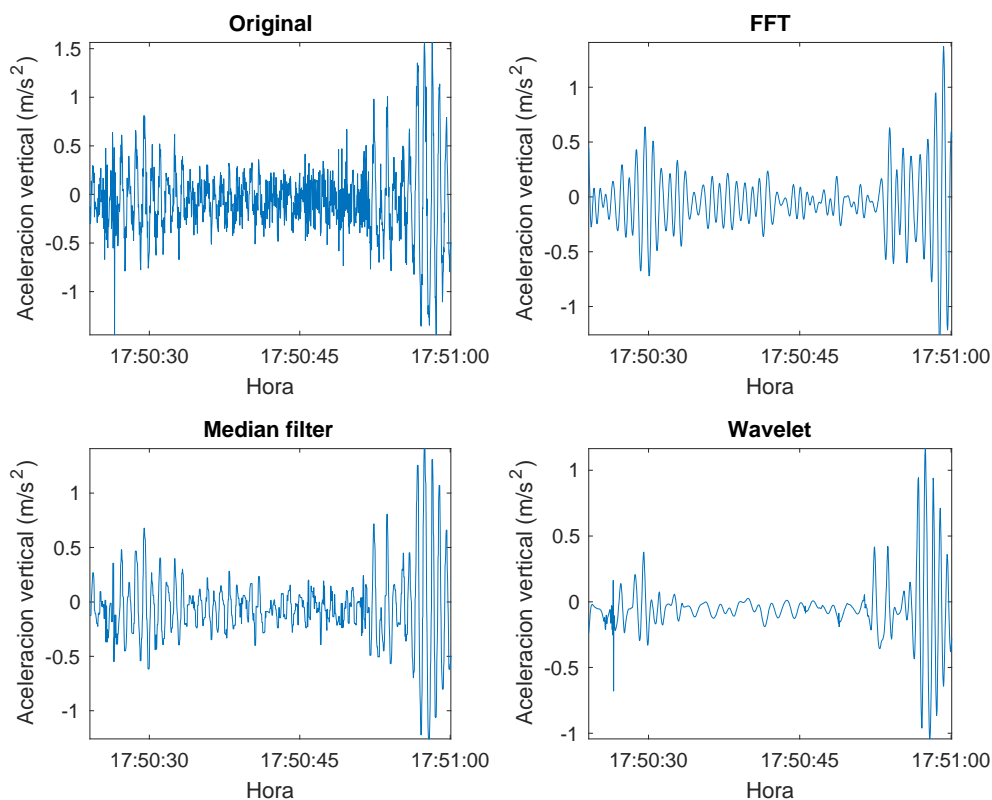


Ilustración 29: Gráficas: original, transformada rápida de Fourier, con filtro de mediana y con filtro Wavelet

Las gráficas de la Ilustración 30, corresponden a la transformada de Fourier de la señal (primera imagen) y la transformada después de eliminar las frecuencias cuyas amplitudes están por debajo del umbral prefijado (20) (segunda imagen).

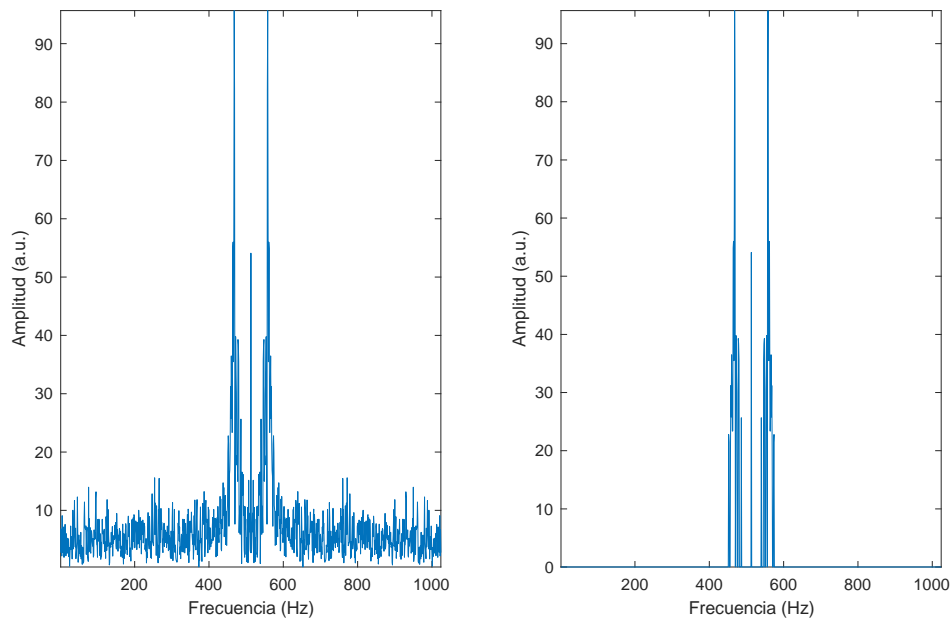


Ilustración 30: Transformada de Fourier antes y después de filtrar las frecuencias

5.1.2. Trayecto de vuelta

Puesto que en trabajos anteriores [18], [39], [41] se ha demostrado que la velocidad del tren y el sentido de circulación influyen en el comportamiento de una zona de transición se decidió realizar la medición en la otra dirección.

En la siguiente gráfica (Ilustración 31) se muestran las aceleraciones registradas durante el trayecto de vuelta. Como en el viaje de ida, se presta especial interés en las infraestructuras del recorrido que incluyen zonas de transición (puente metálico y túnel). A simple vista, la forma de la gráfica es muy parecida a la del otro trayecto, aunque invertida.

Al igual que pasaba durante la ida, las mayores aceleraciones parecen registrarse en el bogie trasero (en la gráfica en color verde) y las menores en la zona media del vagón (puntos en color rojo).

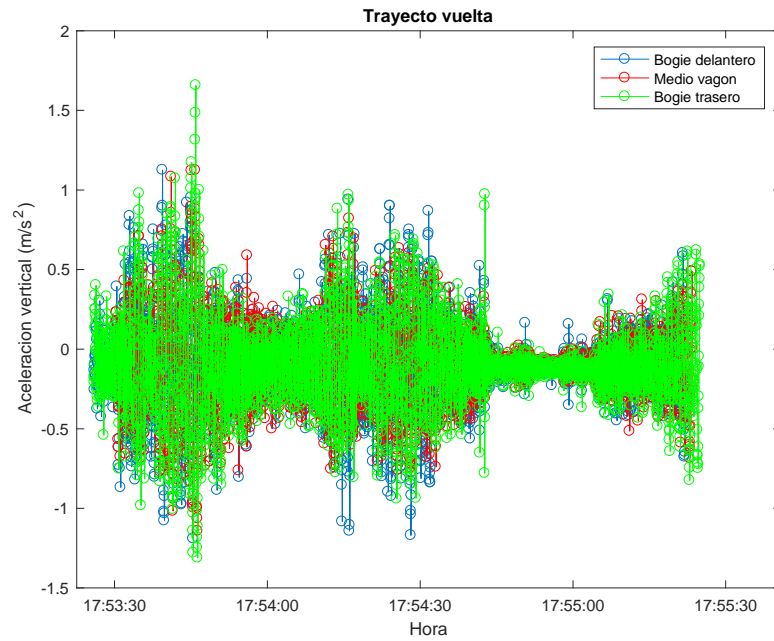


Ilustración 31: Gráfica completa del trayecto de vuelta en tren

En la Ilustración 32 se muestra la parte de la gráfica correspondiente al paso por el túnel.

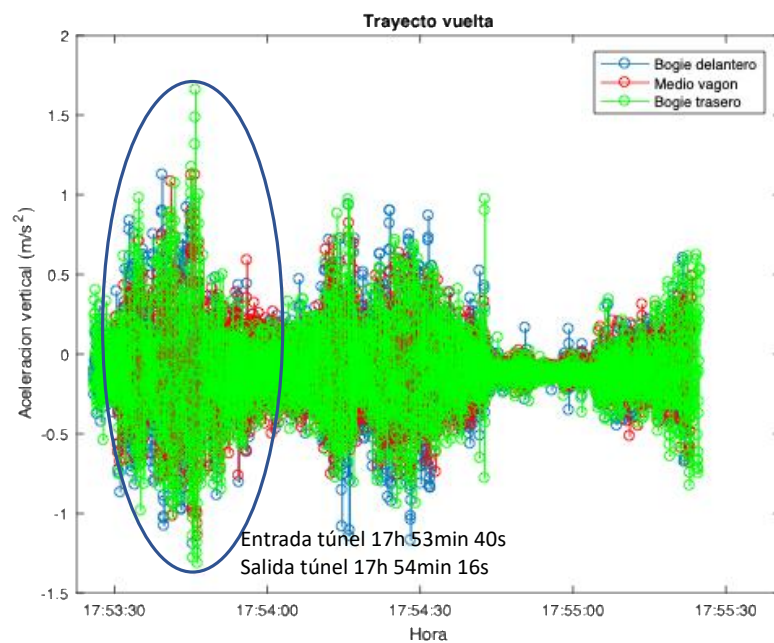


Ilustración 32: Gráfica con las aceleraciones de vuelta en el túnel resaltadas

En la Ilustración 33, se puede la gráfica correspondiente al paso por el túnel durante el trayecto de vuelta. La gráfica es muy similar a la de la ida con claros cambios en la aceleración a la entrada y a la salida del mismo.

Para el trayecto de vuelta, se ha respetado también un espacio antes de la entrada y de la salida del túnel (aproximadamente 80 m y 65 m respectivamente) para poder analizar mejor el efecto producido.

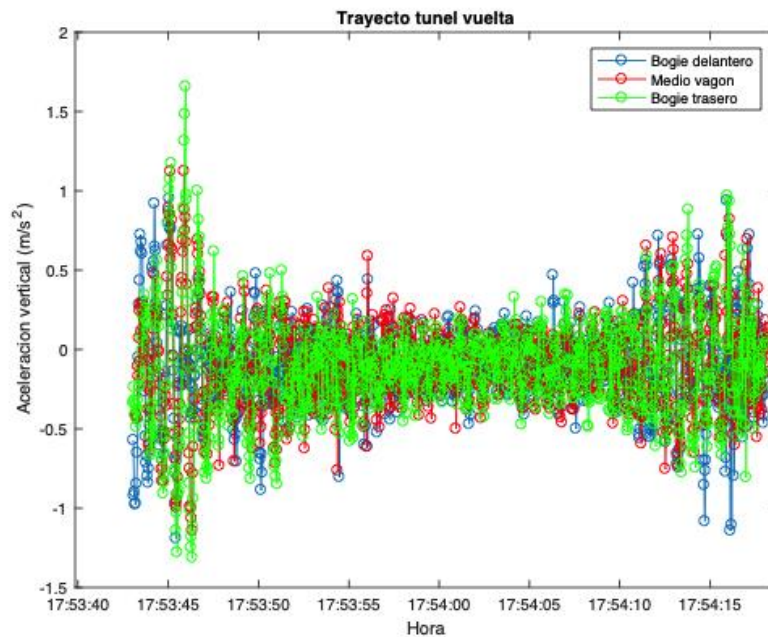


Ilustración 33: Detalle del paso por el túnel en el trayecto de vuelta

En este caso se aprecia que en la entrada al túnel se generan unas aceleraciones mayores que a la salida. Se trata de la misma zona donde en sentido contrario se generaban unas aceleraciones tan grandes a la salida.

Aunque el comportamiento que cabe esperar no es simétrico, en este caso se generan unas aceleraciones mayores en ese punto independientemente del sentido de circulación. Esto hace pensar que la infraestructura en el mismo presenta algún tipo de problema.

En la Ilustración 34 se han dibujado, de forma aproximada las líneas que marcan el límite de entrada y salida del túnel mientras que en la Ilustración 35 se pueden ver las mismas líneas representadas en base al registro de longitud y latitud del trayecto (es decir, con más precisión) y sobre las aceleraciones recogidas en el bogie delantero.

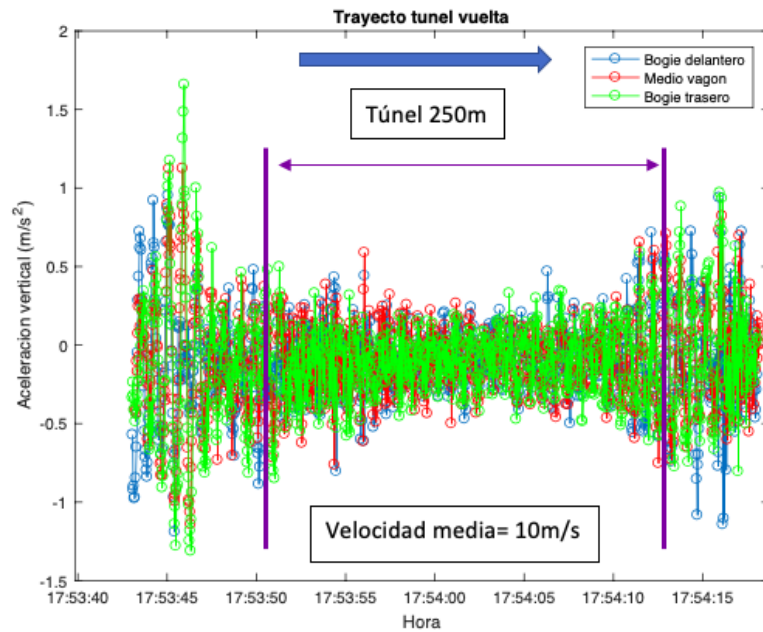


Ilustración 34: Esquema del detalle del paso del túnel en el trayecto de vuelta

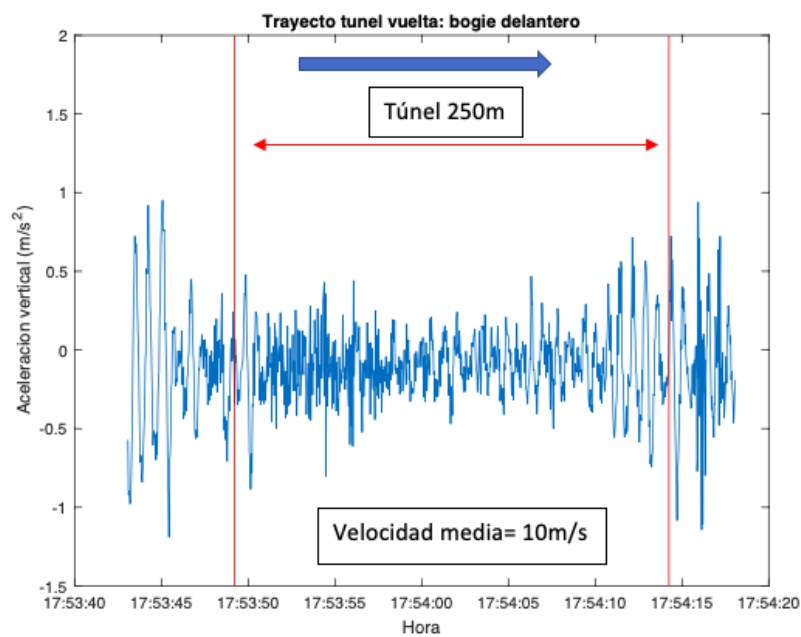


Ilustración 35: Esquema del detalle del paso por el túnel en el trayecto de vuelta. Bogie delantero

Al igual que en el trayecto de ida, a continuación, se exponen las gráficas propias de cada posición del tren de forma independiente (Ilustración 36). En los tres casos, hay grandes aceleraciones a la entrada del túnel. Esto tiene sentido puesto que durante el viaje de ida éstas se produjeron a la salida (la salida del túnel en la ida y la entrada en la vuelta). Por tanto, se puede suponer que una de las dos zonas de transición genera una

mayor alteración en la rigidez y, por tanto, mayores aceleraciones. Por otro lado, en el caso del bogie delantero, parece que se registran mayores aceleraciones a la salida que en los otros dos casos.

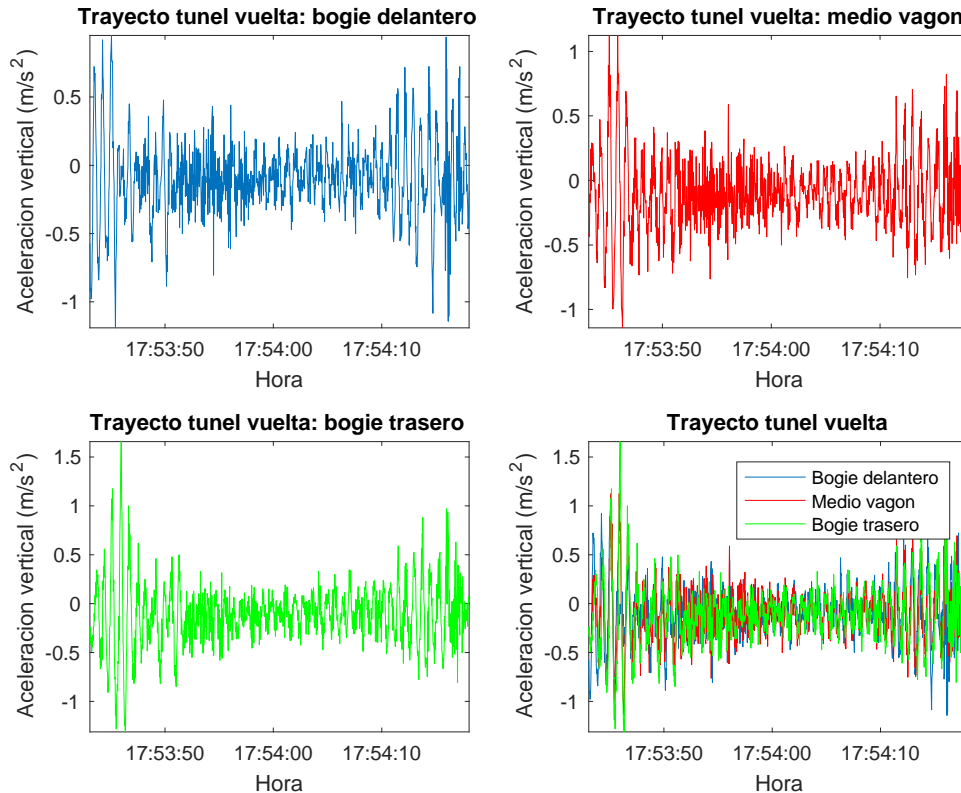


Ilustración 36: Detalle del paso por el túnel en el trayecto de vuelta. Bogie delantero

Es interesante resaltar que se produce una aceleración mayor cuando el tren circula de vía en placa a vía en balasto. Esto corrobora la asimetría del comportamiento de las zonas de transición en función de la dirección de circulación del tren [18], [39], [41] con las mediciones realizadas para este Trabajo Fin de Grado.

Del mismo modo que para la ida, para la vuelta se han utilizado también filtros para reducir el ruido en la señal. Se han aplicado sobre las aceleraciones registradas en el bogie delantero. El tipo de filtros aplicados, así como los parámetros asignados, son similares a los que se emplearon para el caso de la ida.

En la Ilustración 37, se pueden ver las gráficas de la señal original así como las resultantes después de aplicar los filtros mientras que en la Ilustración 38 se expone la

transformada de Fourier de la señal así como la transformada después de eliminar las amplitudes por debajo del umbral (20).

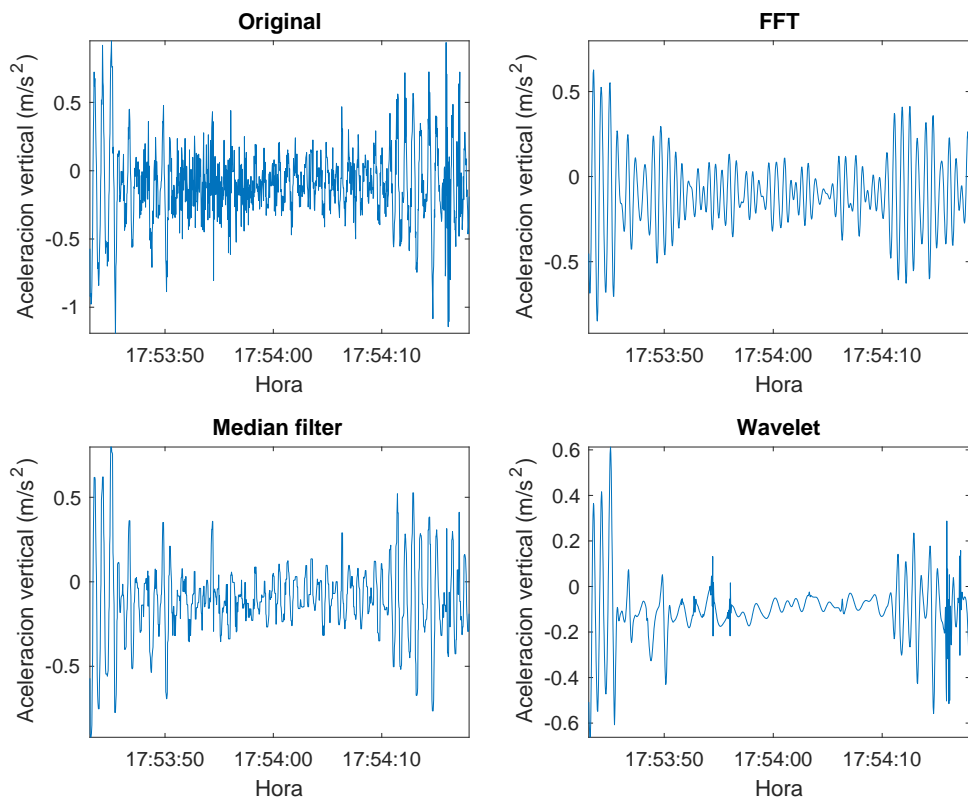


Ilustración 37: Gráficas: original, transformada rápida de Fourier, con filtro de mediana y con filtro Wavelet

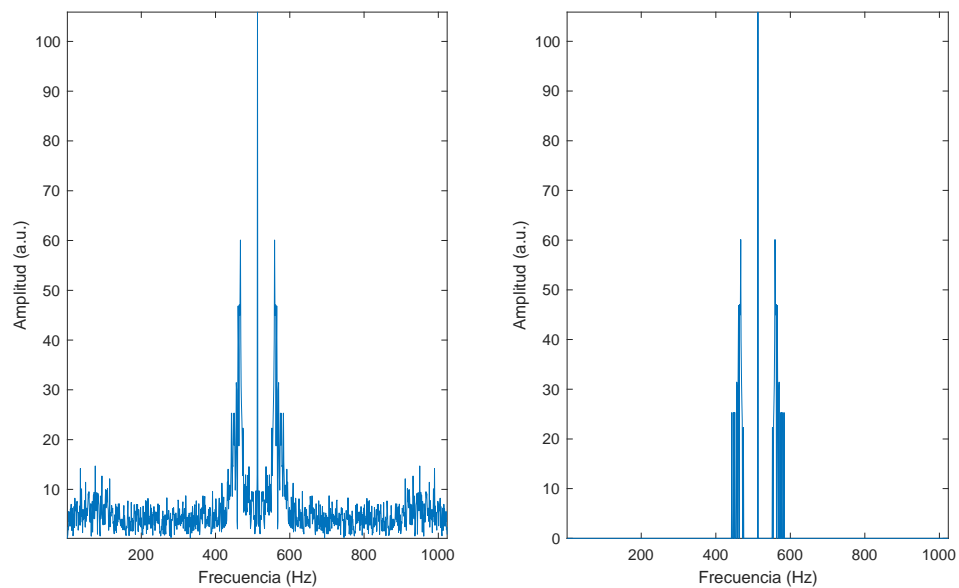


Ilustración 38: Transformada de Fourier antes y después de filtrar las frecuencias

5.2. Cálculo del Confort (norma UNE-EN 12299)

Según la norma UNE EN-12299, la comodidad del viaje es una sensación compleja producida por los movimientos de la caja del vehículo ferroviario. Esta sensación se puede evaluar por medio del nivel de comodidad percibida, que se define como Comodidad Media y que se expresa mediante un índice de comodidad N_{MV} [33].

El índice de comodidad considera las aceleraciones en los tres ejes (x , y , z). No obstante, también es posible calcular un índice de confort para cada dirección (N_{MVx} , N_{MVy} y N_{MVz}). En un principio este trabajo estaba planteado para realizar únicamente un estudio en profundidad de las aceleraciones en el eje z , pero dado que se habían recogido mediante la app resultados de las aceleraciones en x y en y también, se ha aprovechado esa información para calcular el índice global y para cada dirección. El procedimiento empleado es el denominado (según la norma) Método normal. Este método tiene en cuenta la vibración en el suelo de la caja del vehículo por lo tanto es el que más encaja con la finalidad del estudio.

Además, también se ha evaluado la Comodidad Continua de los pasajeros en los tres ejes: C_{Cx} , C_{Cy} y C_{Cz} . De acuerdo con la norma, la Comodidad Continua es el conjunto de valores cuadrático medios de las aceleraciones en las tres direcciones durante un intervalo de 5 segundos [33].

La norma resume en seis puntos los pasos que conducen al cálculo de la Comodidad Medida y de la Comodidad Continua:

1. Medición de las aceleraciones en el suelo del vehículo.
2. Digitalización de las mismas y aplicación de un filtro antiescalonamiento apropiado.
3. Ponderación de frecuencias de las señales.
4. Cálculo de los valores cuadráticos medios cada 5 segundos (de aquí se obtiene la comodidad continua).
5. Cálculo del percentil 95 sobre cada intervalo de tiempo de 5 minutos.
6. Cálculo del índice de comodidad medio (N_{MV}). Se obtiene un índice para zona del tren donde se ha llevado a cabo la medición.

La norma también establece que las aceleraciones deben registrarse, al menos, durante 5 minutos para evaluar correctamente la Comodidad Media. Si se registran durante más tiempo deben hacerse bloques de 5 minutos y, como ya se ha especificado en los pasos anteriores, esos puntos deben dividirse a su vez en bloques de 5 segundos. Como este trabajo abarca un recorrido menor y se centra en un espacio de unos 400 metros, el tiempo total no excede los 40 segundos. Sin embargo, sí se puede garantizar que la velocidad durante ese espacio de tiempo es prácticamente constante (en torno a 10 u 11 m/s). Esta última es una condición que la norma estipula para el correcto cálculo de la Comodidad Media y que, debido a la orografía y a la disposición de las paradas en el recorrido, sería complicado de cumplir sin acortar el tiempo de toma de datos.

Para llevar a cabo esta parte del estudio se han seguido las explicaciones que ofrece el profesor de ferrocarriles Manuel Melis Maynar (2008). En su libro se muestran programas de Matlab para calcular el confort que han resultado de mucha utilidad para este trabajo, especialmente el 11.4 desarrollado por Rodríguez Sánchez y Blanquer Jaraiz (2008) [11] y que ha servido como base para este apartado.

A continuación, se exponen las gráficas de la comodidad correspondientes a la Comodidad Continua en cada eje durante el trayecto de ida. La Ilustración 39, Ilustración 40 e Ilustración 41 corresponden a la Comodidad Continua calculada para el trayecto de ida (tramo correspondiente al túnel que es donde se focaliza el estudio). En el eje x, la que presenta peores resultados es la primera de ellas (bogie delantero), mientras que en el eje y y en el z es la segunda (medio vagón). La mayor parte de los peores resultados de comodidad se dan en el primer tramo de 5 segundos, a excepción de alguno en el cuarto o en el quinto.

La norma UNE 12299 ofrece una escala (Tabla 7) para poder evaluar la comodidad en eje z y en el y. Esta escala está basada en la experiencia y sus valores no tienen una correspondencia plena con el índice de comodidad N_{MV} .

$C_{cy}(t), C_{cz} < 0,20 \text{ m/s}^2$	Muy cómodo
$0,20 \text{ m/s}^2 \leq C_{cy}(t), C_{cz} < 0,30 \text{ m/s}^2$	Cómodo
$0,30 \text{ m/s}^2 \leq C_{cy}(t), C_{cz} < 0,40 \text{ m/s}^2$	Medio
$0,40 \text{ m/s}^2 \leq C_{cy}(t), C_{cz}$	Menos cómodo

Tabla 7: Escala de comodidad de los índices Ccy y Ccz según norma UNE 12299: 2009

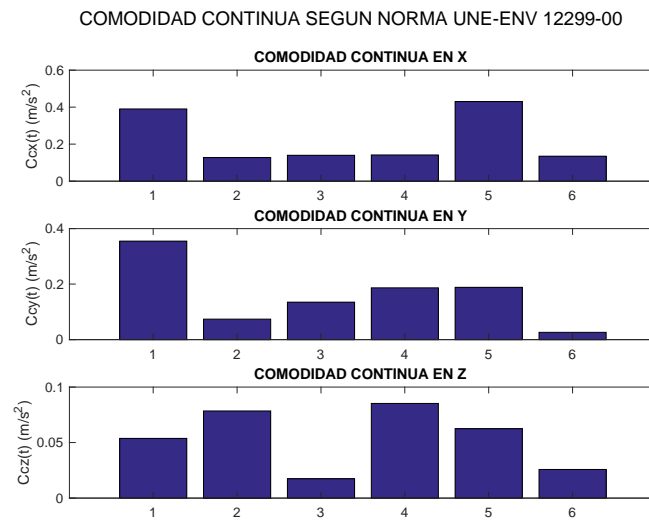


Ilustración 39: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel ida: Bogie delantero

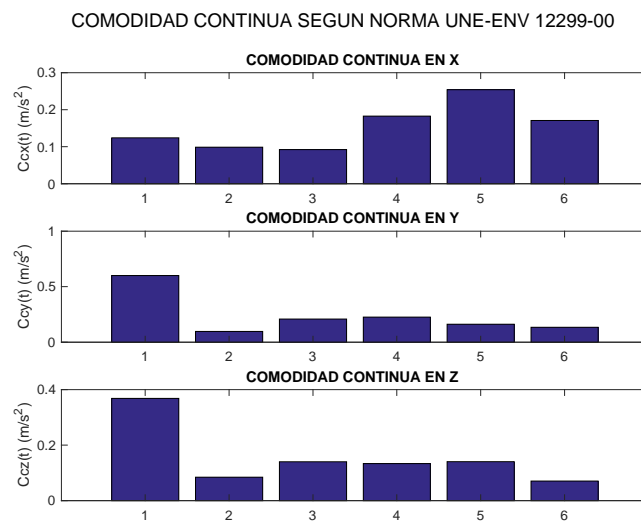


Ilustración 40: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel ida: Medio vagón

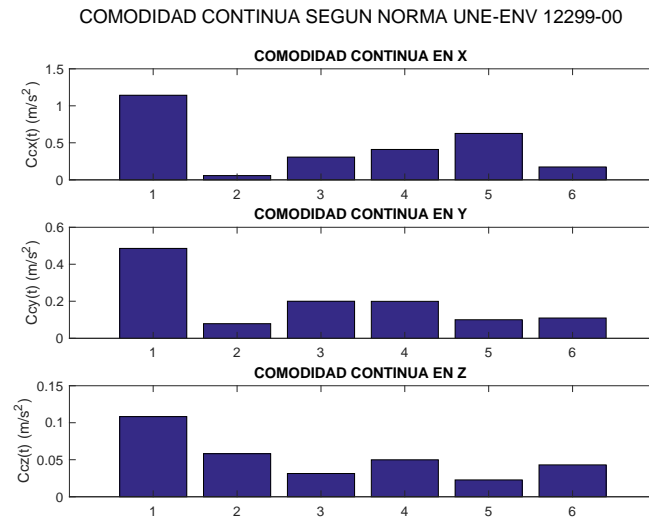


Ilustración 41: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel ida: Bogie trasero

Las siguientes figuras (Ilustración 42, Ilustración 43 e Ilustración 44) corresponden al mismo tramo en el trayecto de vuelta. En este caso los resultados más altos en los tres ejes se alcanzan en la mitad del vagón. Al igual que para el caso de la ida, el tercer bloque (terceros cinco segundos) son los que en conjunto presenta mejores resultados para todas las zonas del tren. Este bloque se puede considerar que es la mitad del trayecto de estudio y por tanto corresponde a un momento del recorrido sobre vía en placa y en la que ya se ha superado la zona de transición de la entrada y no se ha llegado a la de la salida.

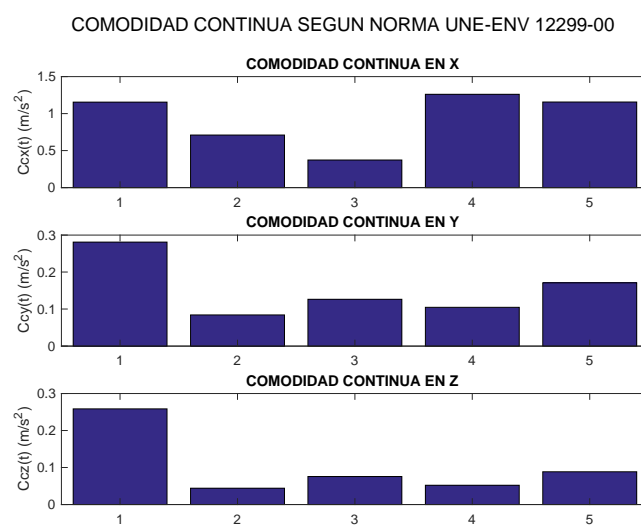


Ilustración 42: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel vuelta: Bogie delantero

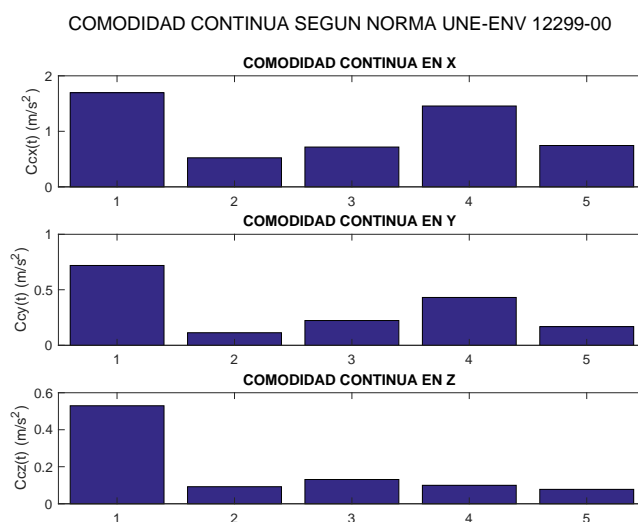


Ilustración 43: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel vuelta: Medio vagón

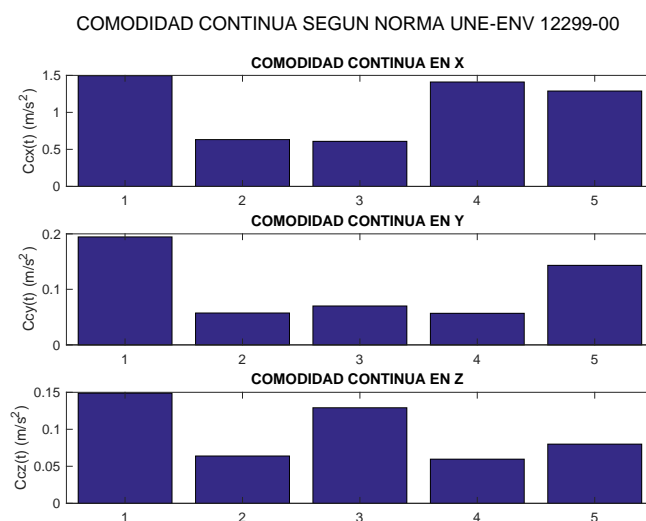


Ilustración 44: Diagrama de Comodidad Continua. Trayecto túnel vuelta: Bogie trasero

Además de la Comodidad Continua, como ya se indicó, se ha evaluado la Comodidad Media. La Tabla 8 contiene la escala que la norma facilita para establecer el índice de comodidad. Para este trabajo, se ha fijado una escala de colores en función de la comodidad tal y como se puede ver también en la tabla.

$N_{MV} < 1$	Muy cómodo
$1 \leq N_{MV} < 2$	Cómodo
$2 \leq N_{MV} < 4$	Medio

$4 \leq N_{MV} < 5$	Incómodo
$N_{MV} \geq 5$	Muy incómodo

Tabla 8: Escala para el índice de comodidad según norma UNE 12299-00

A continuación, Tabla 9, se muestran los índices de comodidad para cada dirección, así como el global.

Trayecto	Zona	N_{MVx}	N_{MVy}	N_{MVz}	N_{MV}
Ida	Bogie delantero	3,4	2,1	0,5	4
	Medio vagón	3,2	3,6	2,2	5,3
	Bogie trasero	6,9	2,9	0,6	7,4
Vuelta	Bogie delantero	7,6	1,7	1,6	7,9
	Medio vagón	10,2	4,3	3,2	11,5
	Bogie trasero	9	1,2	0,9	9,1

Tabla 9: Índices de comodidad por trayecto y posición en el interior del tren

Los resultados obtenidos muestran unos índices de comodidad elevados, especialmente en el eje x. Por el contrario, los índices más bajos se dan en el eje z. En cuando al índice global, el trayecto se puede considerar mayoritariamente como “muy incómodo”.

5.3. Aproximación a una nueva fórmula de cálculo del confort

Como se ha mostrado en el apartado anterior, la obtención del índice de comodidad no es algo inmediato. La norma UNE 12299 ha realizado pequeños cambios en su última versión para calcular dicho índice (el apartado anterior se realizó de acuerdo con la 12299-00) pero ninguno está encaminado a simplificar el proceso, o al

menos a restarlo complejidad. Quizás, la creación de un índice de comodidad fácilmente programable y que resultase aplicable a todos los registros de aceleraciones podría repercutir en una mejora del confort del pasajero.

Proponer un nuevo Índice de Comodidad requeriría de un estudio extenso y no es la finalidad de este Trabajo de Fin de Grado. Sin embargo, sí que se ha realizado una pequeña aproximación para definirlo. Para ello, se ha partido de la Tabla 7, en la que se establecía la escala de comodidad continua para las direcciones z e y según la norma UNE 12299:2009. Como ya se mencionó, no existe una correspondencia plena entre esta escala y la del índice de comodidad N_{MV} (Tabla 8) ya que está basada en la experiencia. A pesar de ello, se ha hecho uso del valor de z que según esa tabla correspondería a una comodidad media ($0,40 \text{ m/s}^2$). Empleando ese valor y trabajando con la curva que une todos los registros de medidas in situ, se han trazado cuatro líneas horizontales: dos coincidiendo con el punto máximo y mínimo de la curva y otras dos con esa comodidad media en positivo y en negativo. En la Ilustración 45, se puede ver gráficamente.

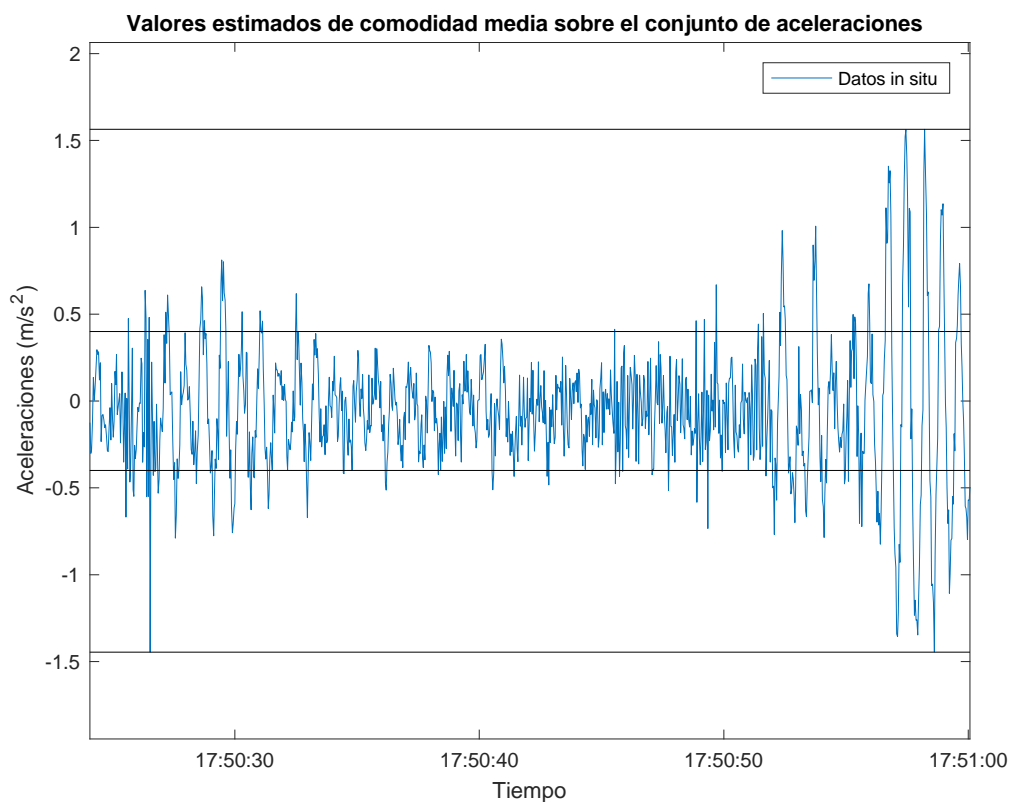


Ilustración 45: Valores estimados de comodidad media sobre la gráfica de aceleraciones medidas in situ. Trayecto de ida. Bogie delantero.

Una vez marcadas las líneas anteriores, se ha procedido a calcular tres áreas distintas: el área de la curva que está entre la comodidad media positiva y el máximo de la curva (área superior), el que está entre la comodidad media negativa y el mínimo de la curva (área inferior) y, finalmente, el que está entre la comodidad media positiva y negativa, es decir, entre 0,40 y -0,40 m/s^2 (área media o área intermedia). En la siguiente imagen (Ilustración 46) se expone gráficamente.

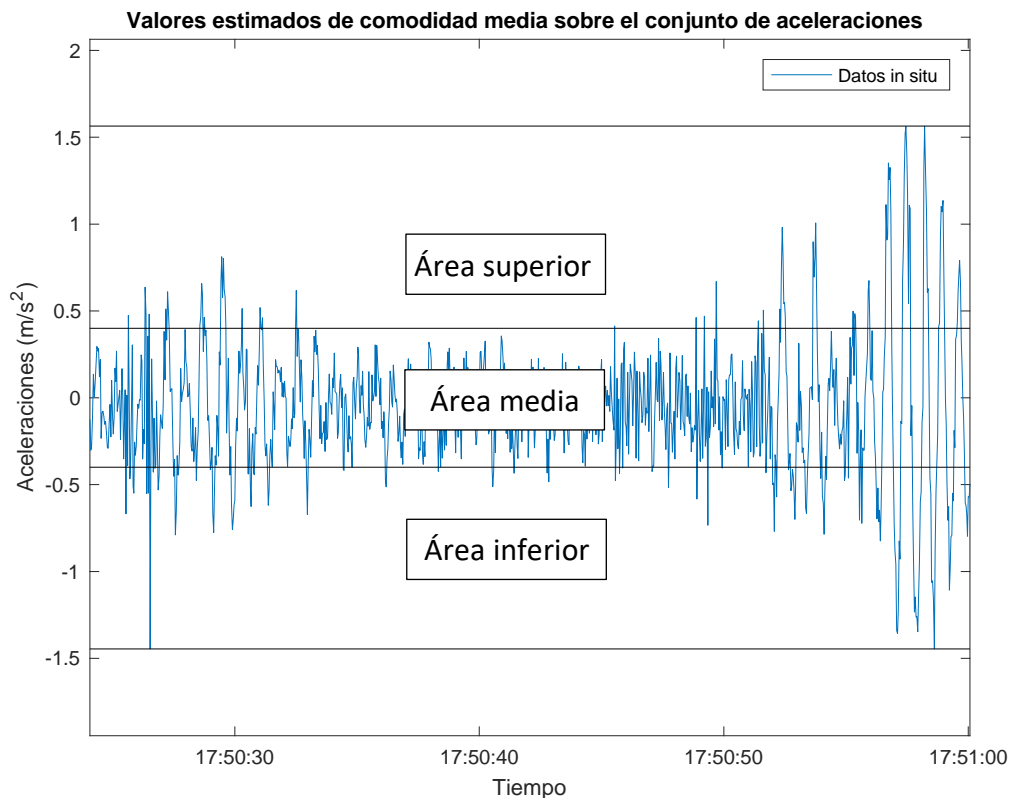


Ilustración 46: Delimitación de las áreas que van a calcularse sobre la gráfica de aceleraciones medidas in situ.

La operación se ha repetido para el mismo tramo (tanto de ida como de vuelta) y para las tres posiciones del tren de las que se tenía datos. A continuación, en la Tabla 10, figuran cinco columnas numéricas. La primera de ellas corresponde al índice de comodidad calculado en el apartado anterior (en base a la norma), las tres siguientes a las áreas resultantes (área superior, inferior e intermedia) y, por último, la quinta columna es el nuevo índice propuesto. La forma de calcularlo es tal y como aparece en la tabla, sumando las áreas superior e inferior y dividiendo ese resultado entre el área del medio. De esta forma, se pretende establecer una relación entre los datos de la curva que se escapan de la comodidad media y los que no.

Trayecto	Zona	N _{MVz}	A _{sup}	A _{inf}	A _{med}	(A _{sup} + A _{inf})/A _{med}
Ida	Bogie delantero	0,5	1,1279 x10 ⁻⁵	1,2583 x10 ⁻⁵	8,5941 x10 ⁻⁵	0,2777
	Medio vagón	2,2	5,3990 x10 ⁻⁵	6,6942 x10 ⁻⁷	1,4220 x10 ⁻⁴	0,3844
	Bogie trasero	0,6	6,0362 x10 ⁻⁶	9,5736 x10 ⁻⁶	7,5055 x10 ⁻⁵	0,2080
Vuelta	Bogie delantero	1,6	6,9230 x10 ⁻⁵	7,8107 x10 ⁻⁵	1,1970 x10 ⁻⁴	1,2309
	Medio vagón	3,2	1,1428 x10 ⁻⁴	4,7811 x10 ⁻⁵	1,3476 x10 ⁻⁴	1,2028
	Bogie trasero	0,9	1,2547 x10 ⁻⁵	1,7822 x10 ⁻⁵	7,4482 x10 ⁻⁵	0,408

Tabla 10: Comparativa de los índices nuevos junto con los anteriores índices de comodidad para cada trayecto y zona del tren.

Hay que destacar que, como se ha indicado, el valor de referencia de la comodidad media (0,40 m/s²) no es un valor que tenga una correspondencia plena con el índice de comodidad calculado con la norma, sino que está basado en la experiencia. Por tanto, esto puede explicar que no exista una reciprocidad entre el índice de comodidad de la norma y el calculado.

Por otro lado, también es importante mencionar que, si un método así se aplicase en el futuro para otro tipo de trabajos, sería indispensable definir el espacio de tiempo comprendido entre los registros, ya que esto repercute directamente en el área de la curva.

Lamentablemente, al centrarse este trabajo en el estudio de las zonas de transición, y en concreto en las que hay a la entrada y salida de un túnel, el tiempo de datos in situ con el que se trabaja es muy bajo (ni tan siquiera alcanza el minuto). Por tanto, no se pueden establecer grandes conclusiones acerca de este método para el cálculo de la comodidad vertical en el interior del tren.

Una futura línea de investigación podría consistir en la toma de datos durante un periodo largo de tiempo (la norma, por ejemplo, recomienda 5 minutos) para así poder

trabajar con una serie larga de aceleraciones en las que sacar el índice y ver si existe una correspondencia con el de la normativa.

5.4. Resultados del modelo

Se ha llevado a cabo una modelización de un tramo de vía de la red de ancho métrico similar a donde se han realizado las mediciones. La parte de vía modelizada corresponde a la entrada al túnel (cambio de vía en balasto a vía en placa con sistema Stedef).

Se han obtenido, las aceleraciones en el vehículo y se pretende compararlas con las medidas realmente. El programa nos permite además obtener desplazamientos verticales en todos los elementos de la superestructura, así como tensiones verticales, entre otros resultados. De esta manera, una vez ajustadas las aceleraciones entre el modelo y el programa dinámico, éste nos puede estimar los desplazamientos verticales y las tensiones en los elementos de la superestructura ferroviaria.

A pesar de que se han realizado un gran número de análisis variando los datos de entrada en el modelo, no se ha logrado llegar a un ajuste excesivamente bueno. Esto se debe, fundamentalmente, a que se desconocen los parámetros para definir el vehículo y la vía y, aunque se ha podido lograr estimar algunos de ellos con bastante precisión, no ha sido posible averiguar con exactitud algunos valores. Entre ellos se encuentran los relativos a la rigidez y al amortiguamiento del material que configura la vía en placa y en balasto. Es por ello, que se han probado diversos modelos alterando estos valores. Sin embargo, las posibilidades son prácticamente infinitas y los resultados no son tan buenos como cabría esperar si se conociesen.

A continuación, y a modo de ejemplo para exponer el tipo de curvas que se pueden exportar del modelo, se muestran una gráfica (Ilustración 47) a la que se llegó aplicando los parámetros expuestos en el apartado 3.3 y en el 3.4 (Definición del modelo de vía y Definición del modelo del vehículo respectivamente). En este caso, se ha ejecutado el programa para un tiempo de 18 segundos y la velocidad es aproximadamente aquella de la que se tiene registro del tren justo en la entrada a la zona de transición (10,65 m/s). Aunque existe una herramienta para visualizar los

resultados, la gráfica siguiente se ha construido exportando el fichero de datos obtenido en DARTS y dibujándolos con Matlab.

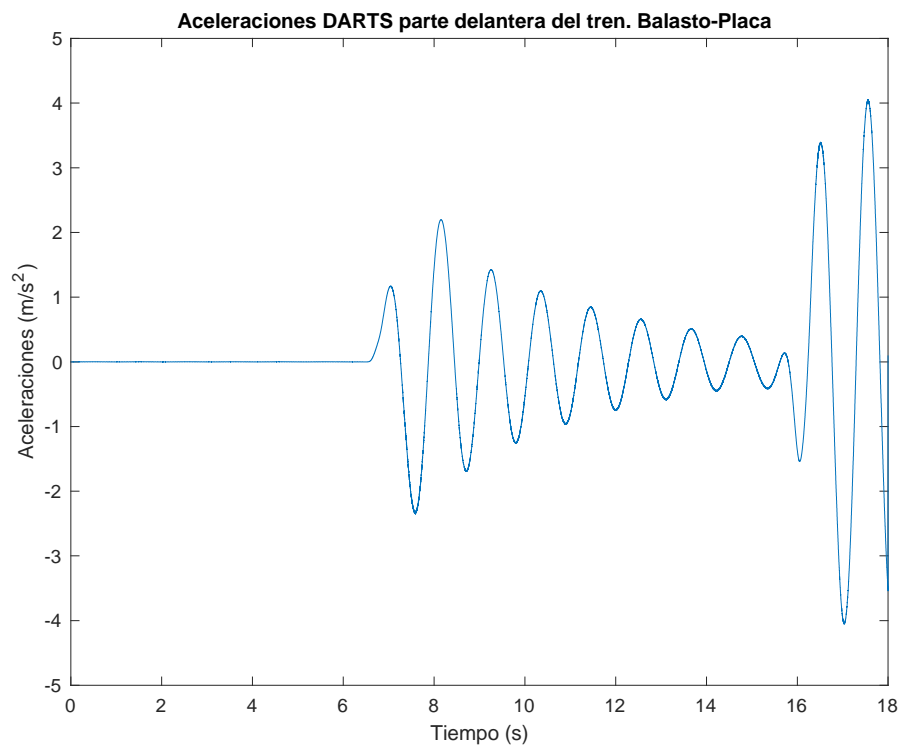


Ilustración 47: Resultado de las aceleraciones obtenidas con DARTS para el cambio de vía en balasto a vía en placa. Trayecto de ida. Bogie delantero.

En la siguiente imagen (Ilustración 48) se ha señalado aproximadamente el lugar donde se encuentra la zona de transición. Debido a la complejidad de la simulación de este tipo de ondas, conviene centrar la atención en el área alrededor del cambio de balasto a placa ya que el propio funcionamiento del programa, así como las ecuaciones de contorno que crea hace que la onda sea “extraña” en los extremos del gráfico.

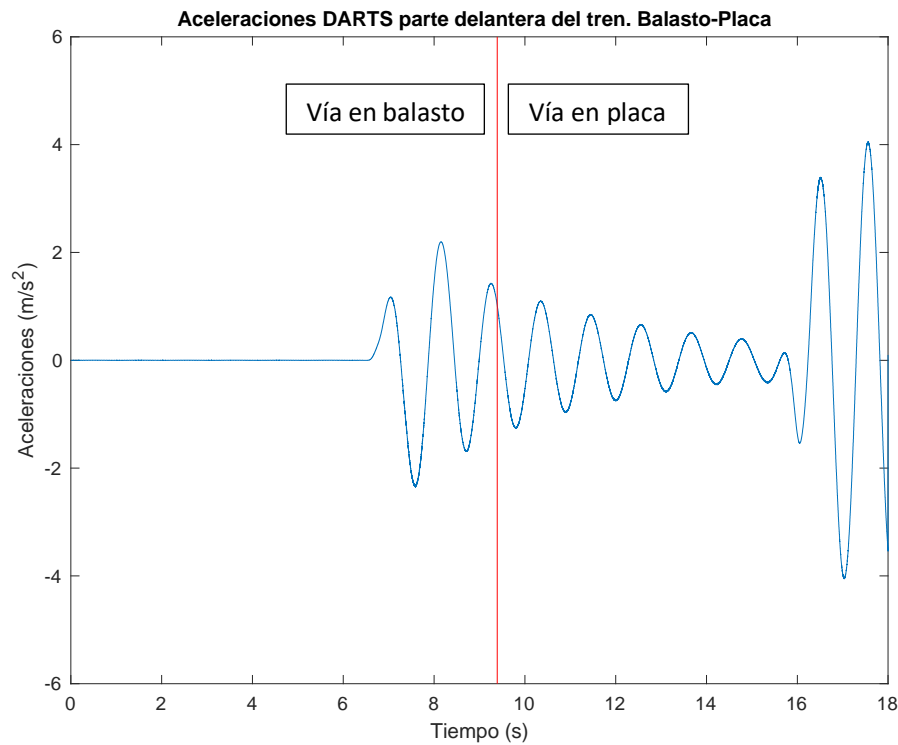


Ilustración 48: Resultado de las aceleraciones y ubicación aproximada de la zona de transición de vía en balasto a vía en placa. Trayecto de ida. Bogie delantero

El modelo anterior corresponde al paso de la vía en placa a la vía en balasto a una velocidad baja (10,65 m/s) que es la que llevaba el tren durante las mediciones reales en ese mismo punto (entrada al túnel en el trayecto de ida). En el trayecto de vuelta, la entrada al túnel (transición de vía en placa a vía en balasto de nuevo) se produjo a una velocidad baja también (si la velocidad media en el túnel a la ida fue de 10 m/s a la vuelta fue de 11). Por tanto, la gráfica anterior podría extrapolarse a la entrada al túnel por el lado contrario.

En cuanto al cambio de vía en placa a vía en balasto, en la siguiente gráfica (Ilustración 49) se muestran las aceleraciones resultantes tras aplicar el modelo en DARTS.

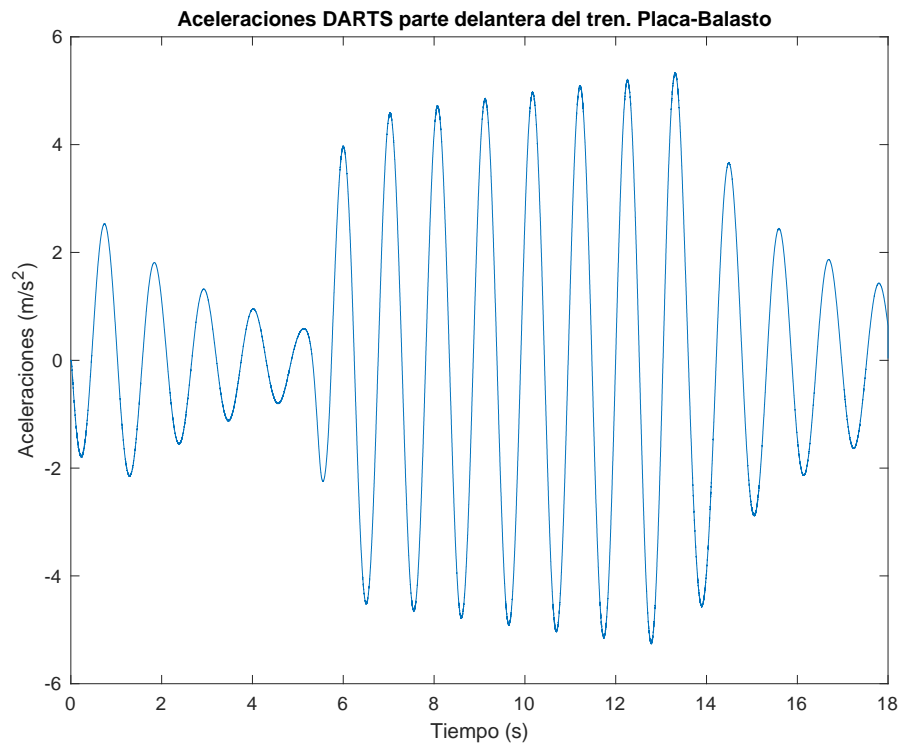


Ilustración 49: Resultado de las aceleraciones obtenidas con DARTS para el cambio de vía en placa a vía en balasto. Trayecto de ida. Bogie delantero.

En la Ilustración 50 se ha indicado la zona de transición aproximada. En este caso, al igual que en el anterior, se ha modelizado la zona tomando como referencia la velocidad de paso por ese punto durante las mediciones in situ que resultó ser 12,81 m/s. En la gráfica llama la atención un gran cambio que se produce en la onda, un poco antes del cambio de placa a balasto. Este hecho es bastante coherente ya que, dependiendo de la disposición de los apoyos, la placa puede tener cierta “libertad” en la zona próxima al balasto generándose aún antes de llegar una primera transición (la onda aumenta mucho repentinamente) para posteriormente seguir creciendo, pero ya de forma más discreta.

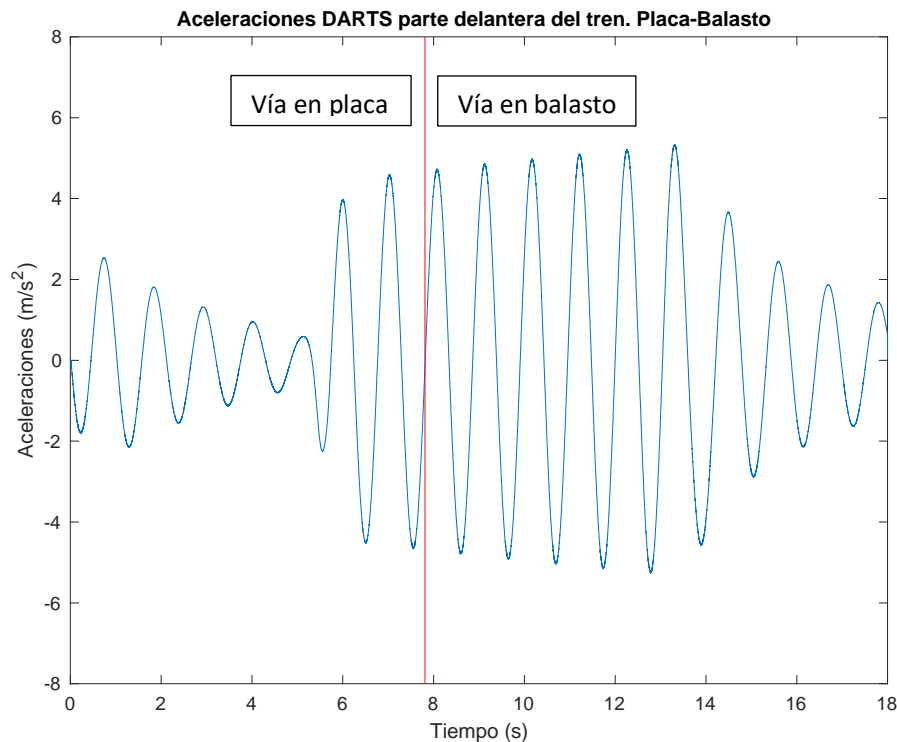


Ilustración 50: Resultado de las aceleraciones y ubicación aproximada de la zona de transición de vía en placa a vía en balasto. Trayecto de ida. Bogie delantero.

5.5. Comparación entre resultados del modelo e in situ

Una vez obtenidas las aceleraciones reales medidas in situ y las del modelo, se ha procedido a juntar las gráficas resultantes. Los resultados se muestran en la Ilustración 51 y en la Ilustración 52. En ambos casos la línea roja corresponde a los datos in situ, la azul a los resultados del modelo y en negro se distingue la zona de transición (cambio de balasto a placa en el primer caso y de placa a balasto en el segundo).

En la primera gráfica se distingue una cierta similitud entre la onda original y la resultante de la simulación en la zona más próxima a la transición. En ambos casos se nota un decrecimiento en la amplitud de la misma al llegar a ella.

En la segunda gráfica también se aprecia una coincidencia en el comportamiento de ambas ondas un poco antes de llegar a la transición ya que en los dos casos se produce un aumento brusco de la onda. Sin embargo, en este caso la magnitud de la onda simulada no resulta tan semejante al de la original como si ocurría en el caso anterior.

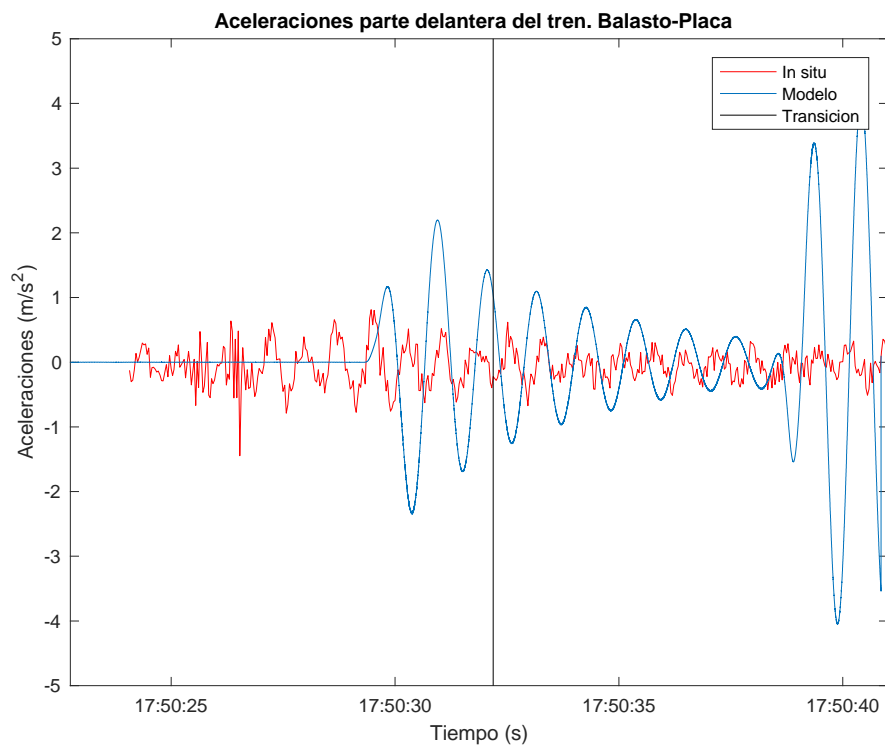


Ilustración 51: Gráficas de mediciones in situ y modelo superpuestas. Balasto-Placa. Bogie delantero.

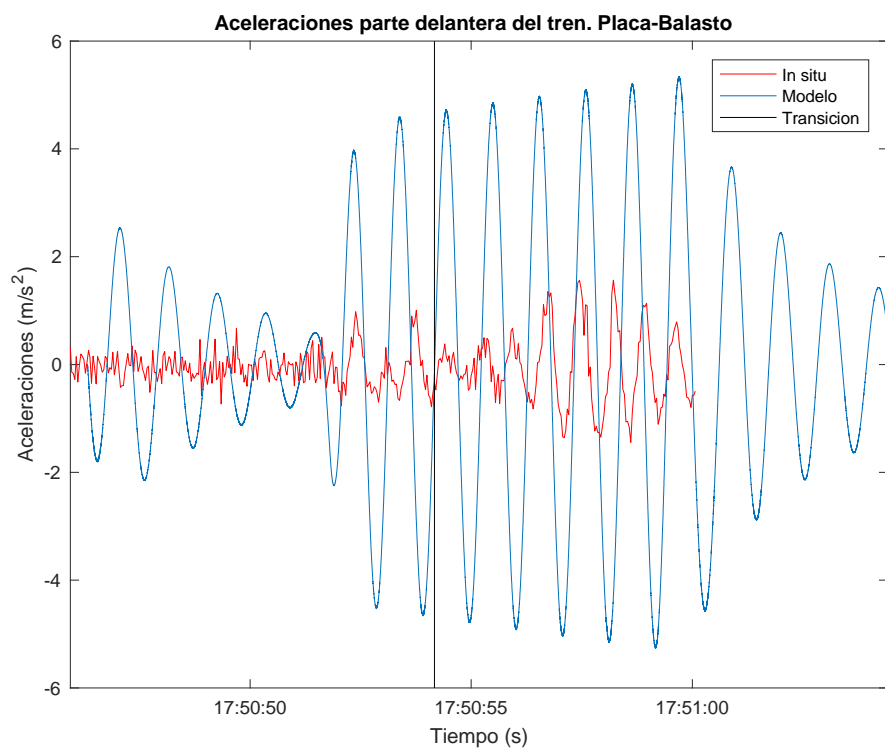


Ilustración 52: Gráficas de mediciones in situ y modelo superpuestas. Placa-Balasto. Bogie delantero.

Como se ha podido ver, al superponer el resultado de la simulación numérica con los datos in situ, el ajuste no es bueno. Tras realizar varios tanteos, se ha podido comprobar que la variación depende fundamentalmente del parámetro K de rigidez de la vía.

También se puede apreciar, que el modelo reproduce de forma amplificada los valores de las mediciones reales en la zona. Para corregirlo, se plantean dos posibles métodos:

1. Disminuir de forma proporcional la amplificación del modelo hasta ajustarlo a la señal real medida, para cada sentido de forma independiente.
2. Variar de forma aleatoria los parámetros de rigidez del modelo de forma iterativa hasta que la solución converja a la solución obtenida de la medición real para cada sentido de circulación.

5.6. Otros datos obtenidos del modelo

Como ya se ha mencionado anteriormente, una de las grandes ventajas de modelizar la zona es que, aparte de los resultados de las aceleraciones, es posible obtener gráficos de desplazamientos, cortantes, momentos, etc. Además, se puede obtener información para distintos elementos como la vía, la placa, el bogie, la suspensión primaria o secundaria, etc. Lógicamente para dar veracidad a estos nuevos datos (especialmente los correspondientes a zonas distintas al interior del vehículo) es necesario tener muy bien calibrado el modelo.

A modo de ejemplo, para mostrar el alcance que puede llegar a tener la modelización de la zona de transición, se exponen algunas gráficas tal y como las representa el programa. Hay que tener en cuenta a la hora de leerlas que la parte superior del eje de ordenadas corresponde a valores negativos mientras que la inferior a valores positivos. Todas las que aquí se representan son referentes a la transición de balasto a placa.

En la Ilustración 53 se muestran los desplazamientos extraídos del programa para el interior del vehículo. La línea azul es el resultado para la parte delantera del tren mientras que la línea roja se refiere a la trasera.

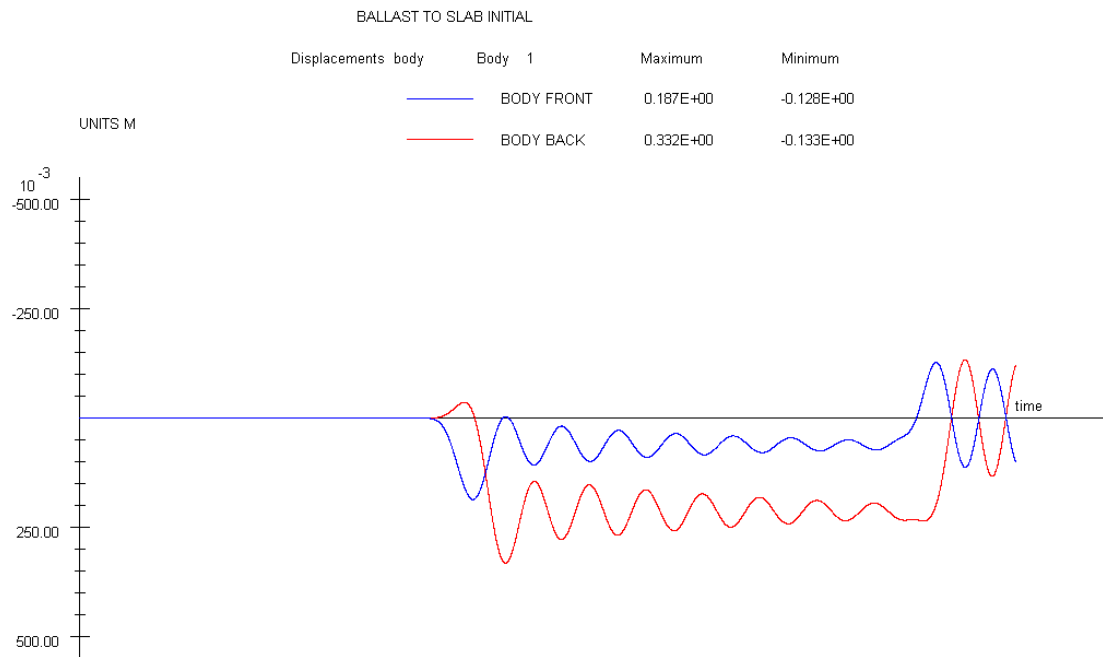


Ilustración 53: Desplazamientos verticales obtenidos con DARTS en el interior del vehículo en la transición balasto-placa. Trayecto de ida.

En la Ilustración 54 se pueden ver los desplazamientos que se obtienen sobre la vía.

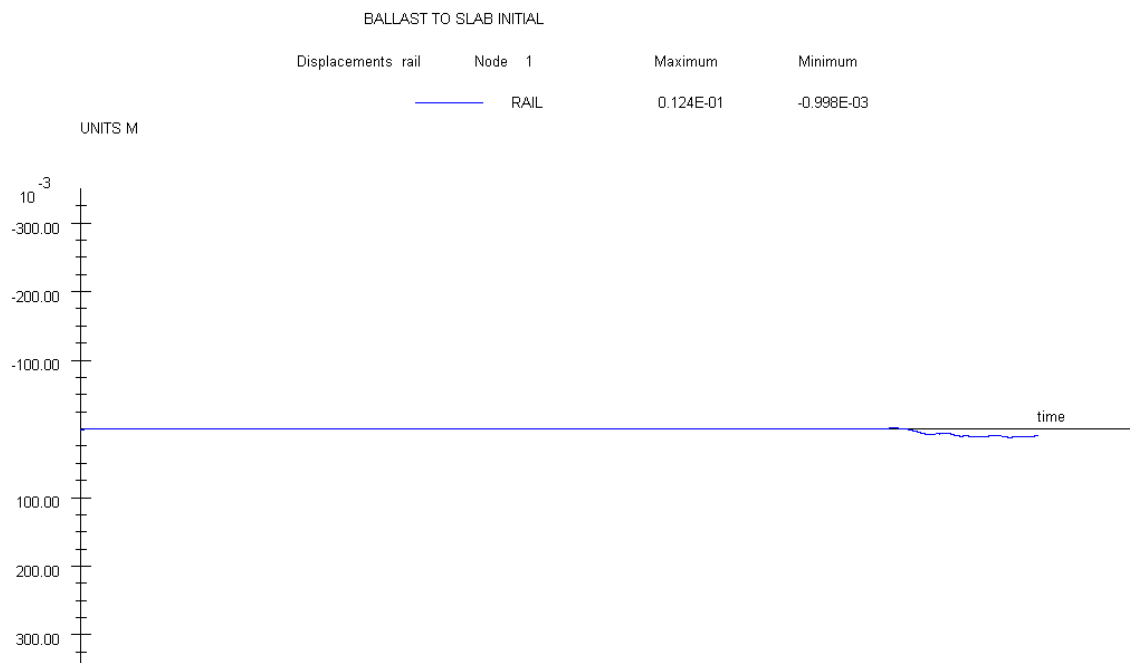


Ilustración 54: Desplazamientos verticales obtenidos con DARTS en la vía en la transición balasto-placa. Trayecto de ida.

Por último, en la siguiente imagen (Ilustración 55) se pueden ver los cortantes simulados en el carril.

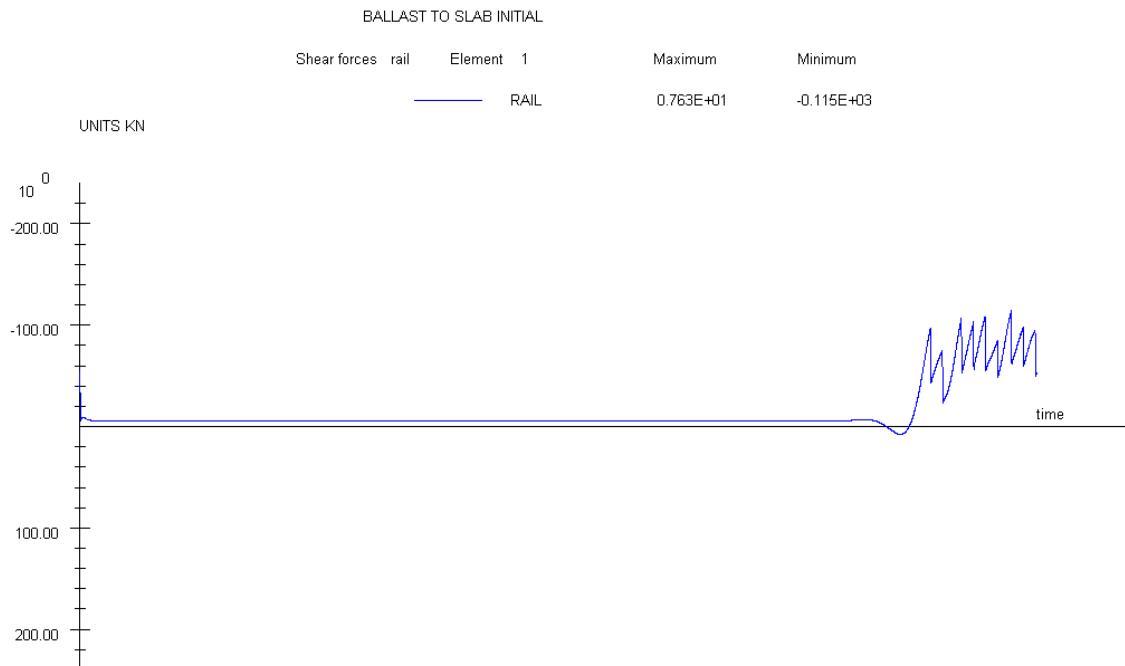


Ilustración 55: Cortantes obtenidos con DARTS en el carril en la transición balasto-placa. Trayecto de ida.

5.7. Soluciones al problema

Como se ha visto, las zonas de acceso a las estructuras dentro de una línea ferroviaria establecen puntos delicados donde la rigidez vertical de la vía varía considerablemente desde un punto a otro de la misma. Existen numerables soluciones en la literatura [18]:

- Actuar sobre la infraestructura:
 - Mediante tratamientos del terreno: suelo cemento, geocélulas, etc.
 - Reforzando con columnas de grava o pilotes o con materiales geosintéticos la subestructura.
 - Usando materiales ligeros como el poliexpan o poliestireno expandido.
 - Diseñando capas de HMA de asfalto bituminosos, estructuras enterradas, cuñas de transición de diferentes materiales (granulares, de hormigón armado, etc.)

- A través de muro de tierra armados.
- Actuar sobre la superestructura.
 - Incrementar la longitud de traviesas desde la zona de hormigón hasta la de balasto convencional
 - Usar pads de rigidez variable bajo el carril y bajo las traviesas, traviesas de materiales compuestos más ligeros, carriles adicionales (internos, externos o combinaciones de ambos), muros de contención del balasto, traviesas de dimensiones especiales (traviesas marco) o utilizar balasto encolado, entre otros.

A la vista de los problemas analizados, en base a los datos previos y el estudio del estado del arte, las soluciones más viables pueden ser:

- Introducir en la zona mantas elastómeras bajo el balasto. Esto generará una atenuación de la vibración en las proximidades de la losa.
- Introducir carriles adicionales entre ambas zonas. Los carriles adicionales han de establecerse con unos pads de rigidez adecuada. Conviene utilizar los mismos que actualmente se utilizan en la zona.
- Introducir pads de rigidez variable desde la zona de hormigón hasta el balasto. Es sin duda la solución más viable económicamente y la que puede establecer un equilibrio entre la zona de balasto y la zona de hormigón.

5.8. Comparativa de costes

A continuación, se detalla la evaluación económica de costes tanto materiales como personales para la realización de un proyecto de toma de datos de aceleraciones tanto por la vía tradicional (empleo de equipos profesionales de medida de la aceleración) como por la vía propuesta (uso de dispositivos móviles).

Para estos cálculos se han empleado valores estándar de precios de equipos necesarios para el registro de datos, especialmente para el caso de acelerómetros clásicos dado que no se ha realizado un estudio exhaustivo de este tipo de dispositivos. Para el cálculo de algunos precios, se han consultado proyectos similares[44], [45], [46].

En la Tabla 11 y en la Tabla 12 se muestran los costes derivados del método tradicional de registro de aceleraciones.

Concepto	Precio Unidad	Cantidad	Importe total	Observaciones
Ordenador (PC)	1.000€	1	1.000€	
Licencia Windows	145€	1	145€	Licencia Windows 10 Home
Licencia Matlab	800€	1	800€	Licencia uso comercial anual
Acelerómetros	600€	3	1.800€	Precio revisable
GPS	80€	1	80€	
Tarjeta adquisición de datos	200€	3	600€	
Billetes de tren (ida + vuelta)	3€	3	9€	
Total			4.434€	

Tabla 11: Costes materiales empleando el registro tradicional de aceleraciones

Concepto	Número trabajadores	Salario hora	Horas invertidas	Salario total
Trabajo previo (estudio del funcionamiento del acelerómetro, selección del recorrido)	1	20	8	160€

Preparación del material (colocación de acelerómetros, GPS, tarjetas y PC)	2	20	2	80€
Registro de aceleraciones en trayecto ferroviario	2	20	8	320€
Programación y procesado de datos	1	20	36	720€
Estudio de la normativa vigente	1	20	4	80€
Análisis de resultados	1	20	24	480€
Conclusiones, propuesta de mejoras y redacción de informe	1	20	12	240€
Total				2.080€

Tabla 12: Costes profesionales empleando el registro tradicional de aceleraciones

Para este primer caso, el presupuesto total (suma de los costes materiales y profesionales) sería de 6.514€.

En la Tabla 13 y en Tabla 14, se puede ver la relación de costes empleando el método que se propone en este trabajo. Tal y como se puede ver el coste material se reduce drásticamente. Eso, sin considerar que es posible que el número de horas invertidas para procesar los datos sea superior empleando acelerómetros tradicionales.

Sin embargo, esto no se ha tenido en cuenta ya que es una suposición puesto que no se ha realizado una toma de medidas en dichas condiciones.

Concepto	Precio Unidad	Cantidad	Importe total	Observaciones
Ordenador (PC)	1.000€	1	1.000€	
Licencia Windows	145€	1	145€	Licencia Windows 10 Home
Licencia Matlab	800€	1	800€	Licencia uso comercial anual
Tablets Android	130€	3	390€	
App registro aceleraciones	Gratis (o coste de aplicación)	3	Gratis (o coste de aplicación)	Se podría estudiar el desarrollo de una app
Total			2.335€	

Tabla 13: Costes materiales empleando el registro de aceleraciones mediante dispositivos móviles

Concepto	Número trabajadores	Salario hora	Horas invertidas	Salario total
Trabajo previo (estudio de la app, selección del recorrido)	1	20	8	160€
Registro de aceleraciones en trayecto ferroviario	2	20	8	320€
Programación en Matlab para el	1	20	36	720€

procesado de datos				
Estudio de la normativa vigente	1	20	4	80€
Análisis de resultados	1	20	24	480€
Conclusiones, propuesta de mejoras y redacción de informe	1	20	12	240€
Total				2.000€

Tabla 14: Costes profesionales empleando el registro de aceleraciones mediante dispositivos móviles

Para esta última situación, el presupuesto total de la actividad es de 4.335€. Por tanto, el precio es del 66,55% respecto al del primer caso. Es decir, los costes se han reducido en un 33%.

En este estudio económico, se ha considerado únicamente la realización de mediciones in situ con dispositivos móviles y no así la modelización de la vía por medio de un programa informático. Para realizar un análisis de costes teniendo en cuenta dicha modelización, habría que sumar el precio de la licencia del programa empleado. Este precio puede ser sumamente elevado. Sin embargo, si se decide considerarlo, hay que tener en cuenta que, por ejemplo, el programa empleado para este trabajo (DARTS) además de proporcionar aceleraciones verticales en el vehículo, simula desplazamientos y tensiones verticales en los elementos de la superestructura, entre otras cosas. De esta forma es posible evitar realizar estas mediciones gracias a que pueden ser obtenidas por el programa únicamente calibrando las aceleraciones reales con las obtenidas por él. Por tanto, es posible ahorrar los costes de medición de estas magnitudes in situ, que son aún mayores que la medición de las aceleraciones en la caja de viajeros.

En resumen, además de los costes en la medición, sustituyendo los acelerómetros por los dispositivos móviles se producen ahorros en la obtención de otros

parámetros de la vía como son las tensiones (sobre el carril, bajo las traviesas y sobre el balasto) y la medición de desplazamientos absolutos y relativos de las traviesas. Una vez calibrado el modelo, estos valores se podrían obtener y los costes serían prácticamente cero.

Como ejemplo del coste que supone la realización de mediciones a pie de vía, una campaña consistente en la obtención de 4 variables (aceleraciones en traviesas, cortantes en la sección del carril, desplazamientos relativos y desplazamientos absolutos en traviesas) en varios puntos a lo largo de la vía (concretamente 8) para dos direcciones, todo ello en un día de trabajo oscila los 20.000 euros [47].

6. DISCUSION

A lo largo de este trabajo, se ha propuesto y aplicado un método con el que se pretende simplificar y abaratar el estudio de las aceleraciones producidas en el interior de un tren al paso por una zona de transición (extrapolable a cualquier zona de cambio en la rigidez de la vía). Para la puesta en marcha de esta metodología sería imprescindible realizar una comprobación y, para ello, sería necesario disponer de una cuantía presupuestaria de la que se carece. Sin embargo, con este trabajo se pretende asentar las bases, así como una posible forma de proceder de cara un futuro proyecto de investigación.

Si la metodología aquí planteada quedase demostrada y se obtuviese un nivel de confianza con mediciones reales que corroborasen la exactitud del modelo, este se podría emplear en el futuro. Eso sí, teniendo presentes sus limitaciones a la hora de obtener datos de otras variables de la vía como pueden ser los desplazamientos o las tensiones verticales en los elementos de la vía.

Analizando los resultados obtenidos en el modelo y, contrastándolos con las mediciones in situ, resulta evidente que los valores de las aceleraciones del modelo en 2D son mayores a los registrados en el terreno. Es probable, que con la obtención de unos coeficientes de reducción sea posible realizar una calibración razonable. No obstante, para comprobar que esta calibración fuese buena, sería necesario medir esas variables (en principio las aceleraciones, pero podrían ser los otros datos obtenidos del modelo) en la vía, con el consiguiente coste económico que ello supondría.

También hay que destacar que operar con valores como la rigidez y la amortiguación (K y C respectivamente) es imposible sin realizar mediciones o disponer de datos del material móvil por parte de los fabricantes. Además, medir en la vía para obtenerlos tiene un coste económico elevado.

7. CONCLUSIONES

El presente estudio ha consistido en la utilización de una herramienta gratuita disponible en una tienda de aplicaciones móviles para evaluar la calidad y el confort en una vía ferroviaria de ancho métrico. Dicha herramienta recoge los datos de la aceleración vertical medidos a través de los acelerómetros que incorporan la mayor parte de los dispositivos móviles.

Con este Trabajo de Fin de Grado se ha pretendido establecer un punto de partida para la evaluación de la calidad de la vía y el confort del pasajero. Además, durante la ejecución de las mediciones, se ha observado que es posibles utilizar las aplicaciones móviles mencionadas para controlar la evolución de la calidad geométrica de la vía a lo largo del tiempo con el consiguiente ahorro en comparación con la metodología empleada tradicionalmente.

Tras la realización de este trabajo, se puede decir que si se controlan las condiciones y el lugar de medición (es decir, mismo tren, mismo aparato, misma posición, mismo tramo analizado) es posible:

- Detectar elementos de vía, aparatos de vía, desvíos, juntas de carriles.
- Localizar estructuras de vía, puentes, túneles.
- Medir las condiciones de confort de marcha dentro del vehículo de pasajeros.
- Obtener otras variables importantes de la superestructura de la vía a través del calibrado de un modelo numérico dinámico de elementos finitos.
- Estudiar soluciones al problema con este modelo sin necesidad de implementarlas previamente en la vía. De esta forma, se puede ver cuál es la mejor forma de actuación antes de llevarla a cabo in situ.

Aunque la precisión de los aparatos móviles con respecto a la de los aparatos de medición convencionales (acelerómetros) se ha visto que es próxima (a través de estudios analizados en la revisión de la literatura existente), no es necesario apoyarse en los valores numéricos medidos, sino que se puede realizar un diagnóstico de la vía mediante la comparación de mediciones del mismo lugar en distintos intervalos de

tiempo. Así se puede conocer la evolución y el deterioro de esos puntos de la vía y proponer medidas correctivas estableciendo un umbral o margen predefinido.

Por otro lado, se ha corroborado con las mediciones obtenidas, que el comportamiento a la entrada y a la salida del túnel no es simétrico, demostrando así teorías existentes sobre el comportamiento en estas zonas.

Las conclusiones a las que se ha llegado a través del este Trabajo de Fin de Grado se resumen a continuación:

- Para que un medio de transporte (en este caso el tren) sea atractivo para los pasajeros es importante tener en cuenta la comodidad o confort en el interior del mismo. Es por ello por lo que, más allá del trazado y de los materiales empleados, a la hora de construir la vía es especialmente importante tener en cuenta algunos puntos que pueden ser más “conflictivos” en este aspecto ya que en ellos se producen aumentos bruscos en las aceleraciones verticales. Este es el caso de las zonas de transición.
- Las zonas de transición constituyen una zona de la vía en la que se produce un cambio de vía en balasto a vía en placa (o viceversa). Esto hace que repentinamente varíe la rigidez y el amortiguamiento de la vía dando lugar a los cambios mencionados en las aceleraciones verticales y que en este trabajo han sido constatados por medio de mediciones in situ.
- Las mediciones realizadas in situ se han llevado a cabo empleando dispositivos móviles (en este caso tablets) en los que se han instalado aplicaciones para medir las aceleraciones (esto es posible gracias a los acelerómetros que estos aparatos llevan integrados). Para realizar este estudio se han registrado y analizado posteriormente mediciones en las que se han encontrado puntos de interés en la vía donde se han constatado grandes aumentos en el valor de las aceleraciones. De entre esos puntos se ha seleccionado una zona de transición para hallar el confort y modelizar por medio del software DARTS.

- Los resultados obtenidos del cálculo del índice de comodidad en la zona de estudio varían verticalmente entre “medio” y “muy cómodo” y en cuanto al índice global entre “incómodo” o “muy incómodo”. Sin embargo, este estudio se centra en el análisis de la influencia de las aceleraciones verticales.
- Aunque con ciertas dificultades (debido a que se desconocían la mayor parte de las propiedades geométricas y mecánicas de la vía y el vehículo) se ha realizado una modelización de la zona de transición tanto en el paso de balasto a placa como de placa a balasto arrojando resultados muy interesantes. Esta simulación muestra que, llevando a cabo buenos ajustes, es posible extraer mucha información de estos modelos (por ejemplo, desplazamientos o tensiones verticales en la vía).
- Tras analizar los resultados obtenidos del análisis de costes derivados de emplear el método convencional (realización de mediciones con los habituales acelerómetros) y el propuesto en este trabajo (uso de dispositivos móviles para medir las aceleraciones) se ha concluido que el coste del nuevo método es aproximadamente un 33% inferior al tradicional. Este ahorro corresponde a la etapa de obtención de las aceleraciones verticales ya que si se deciden extraer otros parámetros de la vía (como desplazamientos verticales bajo las traviesas, tensiones en el carril, etc.) este ahorro es mucho mayor.

Se proponen adicionalmente algunas mejoras para los puntos conflictivos

- La introducción de mantas elastoméricas, las cuales disminuyen la vibración.
- El uso de carriles adicionales que unan la zona de vía en placa con la de vía en balasto.
- El uso de pads de rigidez variable desde la zona de la vía en placa a la zona de la vía en balasto.

En definitiva, a la vista del análisis realizado, se encuentran las siguientes ventajas en este método:

- Obtención de mediciones en tiempo real.
- Registro de datos de forma rápida y económica.
- Rápido, cómodo y accesible para ver problemas de comodidad, así como problemas puntuales de nivelación u otros efectos superficiales en la vía.
- Facilidad de puesta en marcha: sólo es necesario un smartphone o tablet con un acelerómetro incorporado (prácticamente todos llevan uno).
- Se puede ver la evolución de un tramo de vía mediante la única comparación de mediciones a lo largo del tiempo.
- Extrapolando resultados de las aceleraciones reales medidas in situ con las obtenidas en el programa, se pueden dar por válidas otras magnitudes que devuelve el programa tales como desplazamientos verticales y tensiones verticales en los elementos de la superestructura, sin tener que realizar estas mediciones en vía. Lo que supone un ahorro adicional.

También se han advertido algunas desventajas:

- Es imprescindible ocupar la misma posición dentro del vehículo para realizar las mediciones ya que, en función de la zona del mismo, éstas pueden variar bastante (más elevadas a la altura de los bogies que en el centro del coche de pasajeros).
- Hay que tener en cuenta que el sistema móvil real del vehículo puede sufrir variaciones, es decir, sus muelles y sus amortiguadores pueden variar a lo largo del tiempo sufriendo deterioros y holguras que pueden falsear las mediciones. Para tener en cuenta esto es necesario descomponer la onda obtenida en las mediciones realizadas desde el interior del vehículo. Por tanto, se propone como línea de trabajo para estudios futuros.

El proyecto ha demostrado que es posible medir el confort ferroviario con una aplicación móvil, con un coste mucho menor que la instalación de acelerómetros en un vehículo ferroviario.

De momento se ha conseguido filtrar la señal y disminuir el ruido, pero no se ha separado la señal de las masas suspendidas y las no suspendidas. Sin esta separación no

se pueden todavía dar valores de las imperfecciones de la vía (únicamente por la diferencia relativa entre medidas). Por tanto, una futura línea de trabajo sería realizar dicha separación de la señal y ver cómo se puede estudiar la imperfección de la vía a través de mediciones con aparatos móviles de una forma rápida, económica y lo suficientemente precisa para que pueda ser útil. También es necesario establecer un intervalo de confianza entre los valores reales, teóricos y los extrapolados (reales deducidos). Por temas fundamentalmente económicos, no es posible saber el error entre los datos registrados con los dispositivos móviles y los que realmente se obtendrían a partir de la realización de una campaña de mediciones en vía. Por ello, se ha confiado plenamente en los estudios comparativos previos.

Con este trabajo, se ha visto que, de cara al futuro, es muy importante y necesario conocer los parámetros empleados en el modelo computacional tales como rigideces y amortiguamientos para realizar una correlación válida y proponer una buena metodología. Además, los trabajos futuros deben ir encaminados a mejorar el método aquí propuesto y conseguir establecer unos umbrales de error entre los datos extraídos del modelo y los obtenidos de una campaña de mediciones en vía.

REFERENCIAS

- [1] Redacción ABC, “¿Por qué el ferrocarril español tiene un ancho de vía distinto?,” 2012. [Online]. Available: <https://www.abc.es/20120423/archivo/abci-ancho-espanol-201204231243.html>.
- [2] C. Martínez Ballesteros, “Breve historia del ferrocarril en España,” 2016. [Online]. Available: <http://elblogdecesarmb.blogspot.com/2016/04/breve-historia-del-ferrocarril-en-espana.html>.
- [3] Observatorio del transporte y la logística de España, “Informe anual 2017,” 2018.
- [4] H. Suzuki, “Research trends on riding comfort evaluation in Japan,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 212, no. 1, pp. 61–72, 1998.
- [5] Adif, “Infraestructuras y estaciones. Nuevos Planes de Actuación en Cercanías.” [Online]. Available: http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/planes_infraestructura/planes_infraestructura.shtml.
- [6] Europa Press, “Fomento invertirá hasta 2022 casi 530 millones en las cercanías de Cantabria,” 2017. [Online]. Available: <https://www.europapress.es/cantabria/noticia-fomento-invertira-2022-casi-530-millones-cercanias-cantabria-20171204133602.html>.
- [7] Ministerio de Fomento; Renfe; Adif, “Planes de actuación. Núcleo de Asturias,” 2017.
- [8] Ministerio de Fomento; Renfe; Adif, “Planes de actuación. Núcleo de Cantabria,” 2017.
- [9] L. (CENIT-B. Ubalde Claver, “Condicionantes Legales y Técnicos del Ferrocarril de Vía Estrecha a lo largo de su Historia en España,” *III Congr. Hist. Ferrov. - Gijón 2003 "Siglo y medio Ferrocarr. en Astur.*, no. 1435 mm, p. 18, 2003.

- [10] A. López-Pita, P. F. Teixeira, C. Casas, L. Ubalde, and F. Robusté, "Evolution of track geometric quality in high-speed lines: Ten years experience of the Madrid-Seville line," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 221, no. 2, pp. 147–155, 2007.
- [11] M. Melis Maynar, *Apuntes de introducción a la Dinámica vertical de la vía y a las Señales digitales en ferrocarriles*. 2008.
- [12] H. Magalhães, J. Ambrósio, and J. Pombo, "Railway vehicle modelling for the vehicle-track interaction compatibility analysis," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part K J. Multi-body Dyn.*, vol. 230, no. 3, pp. 251–267, 2016.
- [13] P. E. Nikraves, *Computer-aided analysis of mechanical systems*. Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [14] P. Flores, J. Ambrósio, J. C. P. Claro, and H. M. Lankarani, *Kinematics and Dynamics of Multibody Systems with Imperfect Joints*, vol. 34. 2008.
- [15] C. Esvel, *Modern Railway Track*, 2nd Editio. The Netherlands: MRT-Productions, 2001.
- [16] C. Sasaoka and D. Davis, "Implementing Track Transition Solutions for Heavy Axle Load Service.," 2005.
- [17] A. Kalliainen, P. Kolisoja, and A. Nurmikolu, "3D Finite Element Model as a Tool for Analyzing the Structural Behavior of a Railway Track," Elsevier B.V., 2016.
- [18] R. Sañudo, L. Dell'Olio, J. A. Casado, I. A. Carrascal, and S. Diego, "Track transitions in railways: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 140–157, 2016.
- [19] Esvel Consulting Services, "DARTS: The Dynamic Analysis of Rail Track Structures," pp. 1–114, 2002.
- [20] K. H. Oostermeijer and A. W. M. Kok, "Dynamic behaviour of railway superstructures," *Heron*, vol. 45, no. 1, pp. 25–34, 2000.
- [21] W. M. Zhai, K. Y. Wang, and J. H. Lin, "Modelling and experiment of railway ballast

- vibrations,” *J. Sound Vib.*, vol. 270, no. 4–5, pp. 673–683, 2004.
- [22] G. Michas, “Slab Track Systems for High-Speed Railways,” School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology, 2012.
- [23] AENOR, *UNE-EN 16432-2 (2018) Aplicaciones ferroviarias Sistemas de vía sin balasto Parte 2: Diseño del sistema, subsistema y componentes.* .
- [24] B. Lichberger, *Manual de vía*. 2011.
- [25] S. Vajdić, Marko; Stipanović Oslaković, Irina; Kralj, “Transition zones on the railway track – overview,” in *4th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, 2014, no. April.
- [26] Y. S. Kang, S. C. Yang, H. S. Lee, Y. B. Kim, S. Y. Jang, and E. Kim, “A Study of Track and Train Dynamic Behavior of Transition Zone Between Concrete Slab Track and Ballasted Track.”
- [27] “Adif - Líneas de alta velocidad.” [Online]. Available: http://www.adifaltavelocidad.es/es_ES/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/lineas_de_alta_velocidad.shtml. [Accessed: 09-Jun-2018].
- [28] Y. Q. Sun and M. Dhanasekar, “A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 39, no. 5, pp. 1337–1359, 2002.
- [29] J. Sundström and S. Khan, “Influence of stationary lateral vibrations on train passengers’ difficulty to read and write,” *Appl. Ergon.*, vol. 39, no. 6, pp. 710–718, 2008.
- [30] M. Khan and J. Sundström, “Vibration comfort in Swedish Inter-City trains—a survey on passenger posture and activities,” ... *17th Int. Conf. ...*, pp. 3733–3736, 2004.
- [31] E. Nathanail, “Measuring the quality of service for passengers on the hellenic railways,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 42, no. 1, pp. 48–66, 2008.

- [32] B. Guirao, A. García-Pastor, and M. E. López-Lambas, "The importance of service quality attributes in public transportation: Narrowing the gap between scientific research and practitioners' needs," *Transp. Policy*, vol. 49, pp. 68–77, 2016.
- [33] AENOR, *UNE-EN 12299*. 2009, p. 46.
- [34] AENOR, *UNE-ISO 2631-4*. 2014, p. 18.
- [35] A. Azzoug and S. Kaewunruen, "RideComfort: a development of crowdsourcing smartphones in measuring train ride quality. *Frontiers in Built Environment*, 3, 3," 2017.
- [36] V. Douangphachanh and H. Oneyama, "A Study on the Use of Smartphones for Road Roughness Condition Estimation," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2014, no. 1, p. 114, 2014.
- [37] V. Astarita, V. Rosolino, T. Iuele, M. V. Caruso, V. Giofrè P, and F. De Masi, "Automated Sensing System for Monitoring of Road Surface Quality by Mobile Devices," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 111, pp. 242–251, 2014.
- [38] S. Chandra, "Modelling of Soil behaviour," *J. Eng. Sci. Technol.*, no. 2–5, p. 68, 2014.
- [39] R. Sañudo Ortega, "Optimización en el diseño de zonas de transición en vías de alta velocidad usando métodos numéricos."
- [40] M. Cerrada Larrauri, "Análisis dinámico y numérico de la vía en las zonas de transición. La influencia de la posición de los apoyos." p. 89, 2016.
- [41] R. Sañudo, V. Markine, and J. Pombo, "Study on different solutions to reduce the dynamic impacts in transition zones for high-speed rail," *J. Theor. Appl. Vib. Acoust.*, vol. 3, no. 2, pp. 199–222, 2017.
- [42] Adif, "Traviesas bibloque de hormigón," 1998.
- [43] R. Sañudo, M. Cerrada, B. Alonso, and L. Dell'Olio, "Analysis of the influence of support positions in transition zones. A numerical analysis," *Constr. Build. Mater.*,

vol. 145, pp. 207–217, 2017.

- [44] M. J. Cano Adán, “Análisis De Registros De Aceleraciones Verticales En Caja De Grasa Y Correlación Con La Infraestructura,” 2015.
- [45] E. Ruiz Sandoval, “Análisis y metodología de ensayo de seguridad, confort y condiciones de carga de material móvil ferroviario remolcado,” 2008.
- [46] F. Muñoz de Diego, “Estudio del confort ferroviario mediante dispositivos de comunicaciones móviles inteligentes (Smartphones),” 2016.
- [47] “Proyecto DINATRANS. Transiciones dinámicas para vías de alta velocidad y mercancías. Convocatoria INNPACTO 2012.” .